Digitized by the Internet Archive
in 2016

https://archive.org/details/grandesvoutes34sejo

GRANDES VOÛTES

GRANDES VOÛTES

PAR

Paul SÉJOURNÉ

INGÉNIEUR EN CHEF DES PONTS ET CHAUSSÉES
INGÉNIEUR EN CHEF DU SERVICE DE LA CONSTRUCTION
DE LA COMPAGNIE PARIS-LYON-MÉDITERRANÉE
PROFESSEUR A L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES

TOME III

1RE PARTIE — VOÛTES INARTICULÉES
(SUITE)

LIVRE I. — DESCRIPTION DES PONTS QUI ONT OU AVAIENT DES VOÛTES INARTICULÉES DE 40m ET PLUS DE PORTÉE
(SUITE)

ARCS ASSEZ SURBAISSÉS
ARCS TRÈS SURBAISSÉS

LIVRE II. — CE QUE L'EXPÉRIENCE ENSEIGNE DE SPÉCIAL AUX VOÛTES INARTICULÉES

BOURGES
IMPRIMERIE Vve TARDY-PIGELET ET FILS
15, RUE JOYEUSE, 15
—
1913

Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés pour tous pays.

Copyright by Paul Séjourné — 1913.

AVERTISSEMENT[1]

DIVISIONS DE L'OUVRAGE

CLASSEMENT DES PONTS EN SÉRIES ET DANS CHAQUE SÉRIE PAR DATE

TABLEAUX SYNOPTIQUES — MONOGRAPHIES

SUITE, DANS CHAQUE MONOGRAPHIE,

DE FIGURES, PLANCHES, PHOTOGRAPHIES, RENVOIS, SOURCES.

DÉSIGNATION ABRÉGÉE DES MATÉRIAUX

UNITÉS AUXQUELLES ON RAPPORTE LES QUANTITÉS ET DÉPENSES

1. Divisions de l'ouvrage. — Cet ouvrage est ainsi divisé :

1re Partie : Voûtes inarticulées[2]. — Ce sont les voûtes ordinaires, ainsi qualifiées par opposition aux voûtes articulées.

2e Partie : Voûtes articulées.

3e Partie : Ce que l'expérience enseigne de commun à toutes les voûtes.

Appendice : Pratique des voûtes. — Instructions pour projeter et construire. — Ouvrages courants, Viaducs..... — Répertoires. — Tables numériques.....

Dans les 1re et 2e Parties, sont décrits les ponts qui ont — ou qui avaient — des voûtes de 40m et plus de portée.

2. Classement des Ponts en séries. — J'ai classé par intrados les voûtes inarticulées, par type d'articulation les voûtes articulées.

Ce classement sera détaillé et justifié plus loin.

3. Classement dans chaque série par date d'exécution. — Dans chaque série, les ouvrages sont classés par date. On voit ainsi ce qui, dans un pont, est emprunté à un plus ancien.

4. Tableaux synoptiques. — Monographies. — Les dispositions comparables des ouvrages d'une série sont rapprochées dans des tableaux synoptiques : ainsi groupées, elles instruisent.

1. — déjà donné en tête des Tomes I et II.

2. — On les a quelquefois dites « encastrées » : à proprement parler, elles ne le sont pas. En histoire naturelle, ce qui n'a pas d'articulation est justement qualifié « inarticulé ».

Viennent ensuite les monographies de chaque ouvrage : on y trouvera ce qui lui est spécial, description, histoire, dessins, photographies.

Pour tous les ponts, on a donné une élévation à la même échelle, 2^{mm}, de l'arche ou des arches de 40^{m} et plus.

Autant qu'on l'a pu, en restant clair, on n'a donné qu'une seule fois chaque indication, soit dans les tableaux synoptiques, soit dans la monographie, soit dans les dessins.

5. Suite, dans chaque monographie, de figures, planches, photographies, renvois, sources. — Chaque ouvrage a sa suite :

de figures : f_1 f_2..... ;

de planches : Pl_1 Pl_2..... ;

de photographies : Φ_1 Φ_2..... ;

de renvois au bas des pages : [1], [2]..... ;

de sources : S_1, S_2.... indiquées à la fin de chaque monographie, quelquefois subdivisées : S'_1, S''_1.....[3].

6. Désignation abrégée des matériaux aux tableaux synoptiques et aux dessins.

<table>
<tr><td colspan="5">Béton</td><td>B</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="4">Moellons ordinaires</td><td colspan="3">employés en blocage sans préparation spéciale</td><td>MO</td></tr>
<tr><td rowspan="3">choisis (c'est-à-dire avec sujétion)</td><td rowspan="2">employés en parement</td><td>à joints incertains</td><td>MOI</td></tr>
<tr><td>grossièrement disposés par assises horizontales.</td><td>MOH</td></tr>
<tr><td>employés en voûte</td><td>meplats, lités, prolongeant, soit chaque lit de douelle, soit un lit sur 2, sur 3.</td><td>MOV</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Moellons à face rectangulaire, les 4 arêtes dans un même plan</td><td rowspan="2">Moellons équarris[4]</td><td colspan="3">»</td><td>ME</td></tr>
<tr><td colspan="3">taillés en voussoirs, lits pleins prolongeant exactement ceux de douelle. Joints et face de queue en partie pleins.</td><td>MEV</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Moellons d'appareil[5]</td><td rowspan="2">Dimensions imposées</td><td colspan="2">»</td><td>MA</td></tr>
<tr><td colspan="2">taillés en voussoirs, lits et joints pleins.</td><td>MAV</td></tr>
<tr><td colspan="2">Libages</td><td colspan="3">Pierre de taille de grand appareil grossièrement équarrie.</td><td>L</td></tr>
<tr><td colspan="2">Pierre de taille</td><td colspan="3">Blocs appareillés sur les 6 faces. Toutes les dimensions imposées.</td><td>PT</td></tr>
<tr><td colspan="5">Briques</td><td>Br</td></tr>
</table>

3. — On peut ainsi contrôler et apprécier les renseignements donnés.

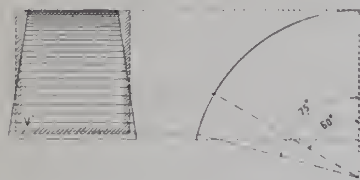
4. — Synonyme : Moellons têtués.

5. — Synonyme : Moellons smillés.

7. Unités adoptées pour comparer les quantités et dépenses.

A. — *Cintres.* — Dans la colonne 14 des Tableaux synoptiques, on a rapporté le cube de bois, le poids de fer et la dépense, au mètre carré de douelle d'une voûte V' à tympans verticaux, exigeant le même cintre.

La largeur uniforme de V' est celle de la voûte considérée :



au joint à 60° de la verticale pour les pleins cintres, les ellipses et les arcs de plus de 120° ;

aux naissances, pour les arcs de moins de 120° ;

c'est-à-dire, pour toutes les voûtes, au joint à partir duquel les voussoirs cessent de pouvoir être soutenus en faisant simplement déborder les couchis.

Comme il convient que les vaux se prolongent jusqu'à l'angle de 75°, on a pris pour surface de douelle celle de la voûte théorique V' :

à partir des angles de 75° pour les ellipses, pleins cintres, arcs de cercle de plus de 150° ;
à partir des naissances pour les arcs de cercle surbaissés de moins de 150°.

B. — *Ouvrage.* — La surface offerte à la circulation, S_p est le produit :

$$S_p = \begin{pmatrix}\text{Longueur totale entre les abouts}\\ \text{des parapets donnée colonne 2}\end{pmatrix} \times \begin{pmatrix}\text{Largeur disponible entre parapets}\\ \text{donnée colonne 3}\end{pmatrix}$$

S_p mesure l'utilité de l'ouvrage.

Soit S_e la surface vue d'élévation entre la voie portée, les murs en aile ou quarts de cône et le terrain naturel ;

Je considère le volume $W = S_e \times$ (Largeur disponible entre parapets).

C'est le volume d'un mur plein ayant même surface d'élévation vue et même largeur utile que l'ouvrage. — Convenons de l'appeler le volume « utile ».

Soient Q et D le cube de maçonnerie de l'ouvrage et sa dépense.

$Q : S_p$ est le cube de maçonnerie à mortier par m. q. de surface horizontale utile. C'est l'épaisseur d'une dalle en maçonnerie de même cube que l'ouvrage et qui aurait même longueur et même largeur utile.

$Q : W$ est le cube de maçonnerie à mortier, par m. c. de volume « utile ».

$D : S_p$ est le prix du m. q. de surface offerte à la circulation.

$D : W$ est le prix du m. c. de volume « utile ».

Toutes ces quantités sont données à la colonne 18 des Tableaux synoptiques.

Quand les fondations sont très au-dessus de la vallée, on a donné de plus les rapports $Q : W'$, $D : W'$.

$W' = (S'_e$, Surface d'élévation au-dessus des fondations$) \times$ (Largeur disponible entre parapets).

W' est le volume « utile » au-dessus des fondations.

Ire PARTIE

VOÛTES INARTICULÉES

(SUITE)

PRÉLIMINAIRES

GROUPEMENT EN SÉRIES DES PONTS A VOÛTES INARTICULÉES

LIVRE I

DESCRIPTION DES PONTS
QUI ONT OU AVAIENT DES VOÛTES INARTICULÉES
DE 40m ET PLUS DE PORTÉE

(SUITE)

LIVRE II

CE QUE L'EXPÉRIENCE ENSEIGNE
DE SPÉCIAL AUX VOÛTES INARTICULÉES

PRÉLIMINAIRES[1]

GROUPEMENT EN SÉRIES DES PONTS A VOÛTES INARTICULÉES

SÉRIES PAR INTRADOS — SYMBOLES

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE ET PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES

SÉRIES PAR VOIE PORTÉE — PONTS EN DEUX ANNEAUX

PONTS AYANT UNE VOÛTE OU DES VOÛTES DE 40^{m} OU PLUS DE PORTÉE

EXEMPLES : SENS DE QUELQUES SYMBOLES

1. Groupement en séries des ponts à voûtes inarticulées. — On a rapproché, dans les mêmes séries, les Ponts qui ont les mêmes caractères principaux : intrados, — une seule grande arche ou plusieurs grandes arches, — voie portée.

2. Séries par intrados. — Symboles. — Le caractère dominateur, celui qui classe tout d'abord les voûtes inarticulées, c'est la forme de l'intrados.

Voici le classement adopté :

Portée 2a — *Montée b* — *Surbaissement* $\sigma = \frac{b}{2a}$

DEMI-COURBES COMPLÈTES	Pleins Cintres. — Séries **C** $\quad \sigma = \frac{1}{2}$ (b.a, a)			
	Courbes surbaissées $\sigma < \frac{1}{2}$ — continues	Courbes surbaissées $\sigma < \frac{1}{2}$ — brisées (**O**)	Courbes surhaussées (**h**) $\sigma > \frac{1}{2}$ — continues	Courbes surhaussées (**h**) $\sigma > \frac{1}{2}$ — brisées (**O**)
Tangentes verticales aux naissances	b.2aσ, 2a Séries **E** Ellipses du 2e degré - Courbes algébriques à forme d'ellipse - Courbes composées de segments de courbes - Anses de panier à m centres...	b.2aσ, 2a Séries **OE** 2 ellipses, 2 anses de panier, 2 paraboles se coupant...	b.2aσ, 2a Séries $\mathbf{E_h}$ Ellipses surhaussées - Anses de panier surhaussées...	b.2aσ, 2a Sér. $\mathbf{O_hC}$ 2 pleins-cintres se coupant...
ARCS SEGMENTS DE COURBES	b.2aσ, 2a	b.2aσ, 2a	b.2aσ, 2a Séries $\mathbf{A_h}$ Segments d'ellipses, d'anses de panier surhaussées, de paraboles...	b.2aσ, 2a Sér. $\mathbf{O_hA}$
	Arcs pour lesquels $\sigma \geqslant \frac{1}{2\sqrt{3}} = \frac{1}{3,464} = 0,288$ dits : peu surbaissés Séries $\overset{\frown}{\mathbf{A}}$	Séries $\mathbf{O}\overset{\frown}{\mathbf{A}}$		
Tangentes inclinées aux naissances	Arcs pour lesquels $\frac{1}{2\sqrt{3}} = 0,288 > \sigma > \frac{1}{7} = 0,143$ dits : assez surbaissés Séries $\widehat{\mathbf{A}}$	Séries $\mathbf{O}\widehat{\mathbf{A}}$		
Séries **A**	Arcs pour lesquels $\sigma < \frac{1}{7} = 0,143$ dits : très surbaissés Séries $\bar{\mathbf{A}}$	Séries $\mathbf{O}\bar{\mathbf{A}}$		

1. — Les mêmes qu'en tête des Tomes I et II.

3. Ponts à une seule grande arche et ponts à plusieurs grandes arches. — On traite de façon fort différente un ouvrage à une seule grande arche ou à plusieurs grandes arches.

De plus, la surcharge ne déforme pas également une voûte unique retombant sur deux culées et la même voûte buttant contre deux piles.

On a donc distingué les ponts à une seule grande arche : $\mathbf{C}^1$, $\mathbf{E}^1$, $\overset{\frown}{\mathbf{A}}{}^1$, $\widehat{\mathbf{A}}{}^1$, $\overline{\mathbf{A}}{}^1$...
et les ponts à plusieurs : $\mathbf{C}^n$, $\mathbf{E}^n$, $\overset{\frown}{\mathbf{A}}{}^n$, $\widehat{\mathbf{A}}{}^n$, $\overline{\mathbf{A}}{}^n$,....

4. Séries par voie portée. — Le travail des voûtes, par conséquent leur épaisseur, dépend de ce qui passe dessus.

On distinguera donc :

les Ponts-route : **C** r^{te}, **E** r^{te}, **A** r^{te},....

les Ponts sous chemin de fer à voie normale : **C** F^r, **E** F^r, **A** F^r,....

les Ponts sous chemin de fer à voie étroite : **C** f^r, **E** f^r, **A** f^r,....

les Ponts-aqueducs : **C** aq, **E** aq,....

....

5. Ponts en deux anneaux. — Par économie, on a récemment, pour de larges ponts de ville, porté la chaussée sur deux minces anneaux, un à chaque tête.

Les voûtes seront désignées comme précédemment, mais en doublant la lettre de l'intrados, par exemple : $\overset{\frown}{\mathbf{A}}{}^1\,\overset{\frown}{\mathbf{A}}{}^1$ r^{te}....

6. Ponts ayant une voûte ou des voûtes de 40^m ou plus de portée. — Les symboles seront suivis de l'indication : $\geqslant$ 40^m.

7. Exemples : Sens de quelques symboles.

$$\overset{\frown}{\mathbf{A}}{}^1\ \mathrm{f^r}\ (\geqslant 40^m)^3$$

désigne un ouvrage en arc (**A**) à une seule grande arche ($\mathbf{A}^1$) ; — assez surbaissé, c'est-à-dire de surbaissement compris entre $\frac{1}{2\sqrt{3}}$ et $\frac{1}{7}$ ($\overset{\frown}{\mathbf{A}}$) ; — inarticulé (pas de signe d'articulation sous **A**) ; — sous voie étroite (f^r) ; — de portée de 40^m ou plus ($\geqslant$ 40^m) ; — le 3e, par ordre chronologique, de la série $\overset{\frown}{\mathbf{A}}{}^1$ f^r ($\geqslant$ 40^m).

$$\mathbf{E}^n\ \mathrm{F^r}\ (\geqslant 40^m)^2$$

désigne un pont en ellipse (**E**) à plusieurs grandes arches ($\mathbf{E}^n$) ; — inarticulé (pas de signe d'articulation sous **E**) ; — sous chemin de fer à voie normale (F^r) ; — de portée de 40^m ou plus ($\geqslant$ 40^m) ; — le 2e, par date, de la série $\mathbf{E}^n$ F^r ($\geqslant$ 40^m).

$$\overset{\frown}{\mathbf{A}}{}^1\,\overset{\frown}{\mathbf{A}}{}^1\ \mathrm{r^{te}}\ (\geqslant 40^m)^2$$

désigne un pont à deux anneaux en arc (**A A**), chacun à une seule grande arche ($\mathbf{A}^1\,\mathbf{A}^1$), de surbaissement $\sigma \geqslant \frac{1}{2\sqrt{3}}$ ($\overset{\frown}{\mathbf{A}}{}^1\,\overset{\frown}{\mathbf{A}}{}^1$) ; — inarticulé (pas de signe d'articulation sous **A A** ; — sous route (r^{te}) ; — de portée de 40^m ou plus ($\geqslant$ 40^m) ; — le 2e, par date, de la série $\overset{\frown}{\mathbf{A}}{}^1\,\overset{\frown}{\mathbf{A}}{}^1$ r^{te} ($\geqslant$ 40^m).

LIVRE I (*Suite*)

DESCRIPTION DES PONTS

QUI ONT OU AVAIENT

DES

VOÛTES INARTICULÉES

DE 40m ET PLUS DE PORTÉE

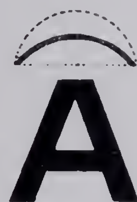
TABLEAUX SYNOPTIQUES

MONOGRAPHIES

VOÛTES INARTICULÉES

EN

ARC ASSEZ SURBAISSÉ [1]



Voir Préliminaires, Tome III. p. 3 et 4 :
1. pour la définition des arcs « assez surbaissés »,
2. pour le sens de ce symbole

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ [1]

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS ROUTE

Série $\overset{\frown}{\mathbf{A}}^{1}\,\mathrm{r}^{\mathrm{te}}{}_{(\geqslant 40^{\mathrm{m}})}$ [2]

Voir Préliminaires, Tome III, p. 3 et 4 :

1. — pour la définition des arcs « assez surbaissé ».

2. — pour le sens de ce symbole.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

PONT Date Symbole	PROJET ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	 Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	 GRANDE VOÛTE INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	 ÉPAISSEURS CORPS Clef *Retombées*	 TÊTES Clef *Retombées*	 MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1^mc de sable, de chaux ou de ciment*	 PRESSIONS en kg $\overline{0^m01}^2$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	 1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de *Trezzo* *Italie* 1370–1377 *ruiné en 1416* $\widehat{A}$[1] r^{te} (> 40^m) 1		» *9^m 10* *entre têtes* » »	Arc de cercle **72^m,00** *21^m 10* $\frac{1}{3,412}$ = 0,293 *41^m 25*	**2^m,05** *Epaisseur uniforme*		Bandeaux : Grès		1° » 2° *Archivolte*
Pont-y-tu-Pridd *Angleterre* 1749–1750 $\widehat{A}$[1] r^{te} (= 40^m) 2	» 250^{mm} 250^{mm} 12^m	3^m 353 *1^m 391* La largeur croît par ressauts de 5' à 7'5 *Largeur entre têtes aux reins :* *1^{m}826*	Arc de cercle **42^m,672** *10^m 668* $\frac{1}{4}$ = 0,25 *26^m 67*	0^m,457 *Epaisseur uniforme*	0^m,762 *Epaisseur uniforme*	Bandeaux : PT[1] Grès dur hauteur uniforme : 0^{m}76 épaisseur : 0^{m}15 à 0^{m}23 queue : 0^{m}30 à 0^{m}45 Douelle : Schiste Petits moellons. hauteur : 0^{m}457 épaisseur : 2 ou 3 moellons pour un voussoir de tête Queutage : MOH[1] *Chaux*		1° 6 voûtes transversales annulaires vues, de 1^m, 1^{m}60, 2^{m}60 environ 2° »
de **Chester** *Angleterre* 1833–1834 $\widehat{A}$[1] r^{te} (= 40^m) 3	*105^m* » 19^m	10^m,20 *10^m 90* Pas de fruit 1^m 44	Arc de cercle **60^m,939** *12^m 801* $\frac{1}{4,76}$ = 0,210 *42^m 67*	**1^m,219** *1^m,829*		Aux naissances, 2 assises en PT[1] Granit Bandeaux, Clef et contre-clefs : PT[1] Marbre Douelle et Queutage : Grès (New red sandstone) *Chaux du pays* *0^{mc},5*		1° 2 étages de voûtes longitudinales en ogive : 4 en haut, 2 en bas. 2° *Archivolte*
des **Bains-de-Lucques** *Italie* 1845-1847 1874-1877 $\widehat{A}$[1] r^{de} (= 40^m) 4	» » 13^m	7^m,83 » Pas de fruit »	Arc de cercle **47^m,835** *7^m 128* $\frac{1}{6,71}$ = 0,149 *43^m 69*	**1^m,80** *3^m,00* Extrados à ressauts		Bandeaux : PT[1] Grès (490^k à 625^k) Corps : Br (130^k à 150^k) *Chaux maigre en pâte — 0^m,666*	Pression moyenne : Clef 16^{k}3 Naissances 11^{k}8 *La courbe de pression passe au 1/3 supérieur de la clef et au milieu des naissances*	1° 4 voûtes transversales cachées en arc 2° »

1 — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

SÉRIE $\widehat{A}^1$ r[te] (>40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE

EXÉCUTION								CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER
FONDATIONS	GRANDE VOÛTE							Q
	CINTRE							DÉPENSE
	FERMES		Cube de bois Poids de fer Dépenses		MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT	TASSEMENTS DE LA CLEF	D
Nature du sol Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg $\overline{0^{m}01}^2$ *Procédé*	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Totaux	par mq de douelle [2]		État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] ; de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Rocher	Fixe	5 » 0m88						
Rive gauche : *Rocher* Rive droite : *En avant,* *Rocher* *En arrière,* *Sable mouvant* *Pilotis*	Fixe *Sapin* Coins sous chaque couchis	6 » »	283mc 12500f	0mc38 16f9	1re assise sur coins en plomb. Bandes de plomb de 20c à 23c dans tous les joints, sur les 2/3 de la douelle à partir des retombées.		t'_v 63mm à 67mm	D = 1 037 500f (non compris les abords) $D : S_p = 968^f7$ $D : W = 48^f4$
Rocher » .. »	Retroussé soutenu au milieu *Sapin* *Pièces secondaires :* *Pin ou peuplier* Caisses à sable Cales	6 *3.5* 1m46 *Fermes intermédiaires 250mm* *Fermes de tête 220mm*	321mc 2430k 33114f	0mc80 6k0 67f5	2 rouleaux	1er décintrement partiel, avant construction des bandeaux : 3 novembre 2e décintrement partiel : Janvier 3e décintrement partiel : Avril 4e décintrement partiel : Août	t_c 75mm t'_v = 183mm	Travaux exécutés en 1874-1877 : Q = 4011mc D = 118 542 lires

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

PONT Date Symbole	PROJET							
	ENSEMBLE		GRANDE VOÛTE					1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
	Longueur entre abouts des parapets Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Retombées*	ÉPAISSEURS — TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg $0^{m}01^{2}$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Claix** *France* 1873-1874 $\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ r^{le} (> 40m)^{5}	*76m* 15mm 15mm 11m20	7m30 *8m10* Pas de fruit »	Arc de cercle **52m,00** *8m05* $\frac{1}{6,46} = 0,155$ *46m*	**1m,50** *3m10*	**1m,20** *2m60*	Bandeaux : PT [1] Bossages 7 tirants en fer de 55mm × 15mm scellés dans les bandeaux Douelle : MEV [1] Queutage : MOV [1] *Ciment artificiel* *Vicat n° 1 — 1000k*	Pression moyenne à la clef : 19k *Dupuit*	1° Voûtes cachées en plein cintre de 1m50, sur piles de 0m80 : 3 en long, 14 en travers (Voûtes d'arête) 6 tirants entre murs de tête. 2° »
du *Saulnier* *France* 1882 *écroulé en 1912* $\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ r^{le} (> 40m)^{6}	*66m* » 17m	3m80 *3m40* Pas de fruit 0m60	Arc de cercle **43m,00** *8m60* $\frac{1}{5} = 0,20$ *31m17*	**1m,30** *2m08*		Bandeaux et Douelle : MAV [1] 22 tirants en fer de 50mm × 15mm entre bandeaux Queutage : MEV [1] Grès calcaire à 300k *Chaux du Teil*	Pression moyenne : Clef : 14k6 Retombées : 14k8 *Dupuit* 2 voitures de 16t	1° En travers : 2 étages de voûtes en plein cintre de 1m50, sur piles de 1m20. En long : 1 voûte en plein cintre de 1m, sur murs de 1m20 2° »
d' **Elyria** *États-Unis* 1886 $\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ r^{le} (> 40m)^{7}	*50m29* » »	7m925 *6m096* Pas de fruit 1m219	Arc de cercle **45m,72** *8m23* $\frac{1}{5,55} = 0,18$ *35m81*	**1m,143** *1m371*		Voussoirs de toute l'épaisseur de la voûte, taillés sur 5 faces Épaisseur : 45'7 Longueur : 76'2 Découpes d'au moins 30' Grès d'Elyria, à 437k *Ciment Portland 1mc* *joints suivant le rayon (mm)*	Pression sans surcharge : Clef : 19k7 Retombées : 24k1	1° Pas d'évidements. Remplissage en pierre cassée et gravier 2° »
de **Wheeling** *États-Unis* 1891-1892 $\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ r^{le} (> 40m)^{8}	*98m91* 42mm5 42mm5 10m50	13m716 *11m528* Pas de fruit »	Arc de cercle **48m,463** *8m635* $\frac{1}{5,612} = 0,178$ *38m22*	**1m,371** *1m829*	**1m,324** »	Bandeaux : PT [1] à crossettes, de toute l'épaisseur de la voûte	Pression maxima aux retombées : 37k3 » 188k/mq	1° 8 murs longitudinaux de 0m61, espacés de 0m888 et 0m863 2° »

1. Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

SÉRIE Â¹ rᵗᵉ (⩾40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE (*Suite*)

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0m01² *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE À MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité de surface utile S_p [3], de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Calcaire schisteux tendre taillé à redans. » Pression moyenne : 12^k1 »	Fixe Poinçons et triangles » Boîtes à sable remplaçant, au dernier moment, des billots	6 3.5^{cm} 1^m50 »	» » 32535^f	» » 68^f9	2 rouleaux A chaque rouleau, 4 tronçons	» *42 jours* 10 avril	t_c = 4^{mm} t'_v = 1 à 2^{mm}	D = 139564^f D : S_p = 251^f6 D : W = 26^f6
Rive droite : *Rocher Schiste apparent* Rive gauche : *Schiste pourri et argile* Pression maxima : 7^k7	Fixe *Pin* Boîtes à sable	3 20^{cm} 1^m50 »	95^{mc} » »	$0^{mc}59$ » »	2 rouleaux	» *39 jours* Octobre et novembre	t_c = 0 t'_v = 52^{mm}	D = 69000^f D : S_p = 275^f1 D : W = 16^f6
Rocher solide *Assiette taillée à la main : explosifs interdits*							t'_v = 203^{mm}	
Rocher	Fixe » Boîtes à sable	12 30^{cm} 1^m346 »						D = 699300^f D : S_p = 515^f5 D : W = 65^f0

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation. 4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets. Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

PONT Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* entre abouts des parapets Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	GRANDE VOÛTE — INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Retombées*	ÉPAISSEURS — TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg (0m01)² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Bellefield** à **Pittsburg** *États-Unis* 1896-1897 $\widehat{A}$[1] rte (= 40m) 9	*103m 94* » 21m34	24m,08 *21m 993* Pas de fruit »	Arc de cercle 45m,72 *11m 176* $\frac{1}{4,10} = 0,244$ *28m 97*	Douelle en PT[1] : 1m,219 *1m,829*	1m,219 *1m 829*	Têtes, sur 2m13 : PT[1] *Ciment lent — 0mc 5* Douelle : PT[1] Epaisseur 0m61 *Ciment lent — 0mc 5* Queutage : Béton Ciment Saylor 1vol Sable 2vol Pierre cassée à 5c 4vol5		1° 7 voûtes longitudinales en Br[1], en arc, de 2m21 à 2m59, sur murs en MOH[1] de 0m69 Murs transversaux en MO[1] de 0m69 2° *Cadres dans les tympans.*
de **Plauen** *Allemagne* 1903-1905 $\widehat{A}$[1] rte (= 40m) 10	*150m* 4mm2 4mm2 20m	17m,00 *16m 00* Pas de fruit 1m20	Arc d'anse de panier à 5 centres 90m,00 *18m 00* $\frac{1}{5} = 0,20$ *Rayons :* *Cerveau (sur 30m) 105m* *Reins 58m50* *Retombées 30m10*	1m,50 *2m 00 à 32m50 de la clef*	1m,50 *2m 00 à 32m50 de la clef*	Petits moellons (10 à 12cm d'épaisseur) de schiste dur (1580k) Aux têtes, crépi de 7cm : Ciment 1vol Sable blanc 5vol *Cerveau* *Ciment Stern 1vol* *Sable 3vol* *Reins et Culées* *Ciment Vorwohler 1vol* *Gros sable 4vol*	Pression maxima : Clef : 32k4 A 32m50 de la clef : 53k4 Retombees : 26k9 *Courbes de pression construites avec points de passage arbitrairement choisis* Pression max. 69k Tension max. 4k5 *Arc élastique* 575k/1mq 3 rouleaux : 23T	1° 6 voûtes longitudinales : 4 de 1m50 entre 2 de 1m80, sur piles de 0m40. Aux reins : 6 voûtes transversales annulaires, vues, de 5m. 2° »
de **Guggersbach** *Suisse* 1906 $\widehat{A}$[1] rte (= 40m) 11	*67m 10* 13mm 13mm 12m	5m 00 *3m 90* Pas de fruit 0m60	Arc de cercle 50m,20 *8m 22* $\frac{1}{6,107} = 0,164$ *42m 431*	1m,10 *1m 60*	1m,10 *1m 60*	Béton 250k de ciment par mètre cube de béton (aux culées, 180k)	Pressions minima et maxima Intr. / Extr. Clef 13k, 15k / 18k5, 22k 1/4 de l'arc 12k, 17k5 / 14k, 19k5 Retomb. 16k, 22k5 / 6k, 12k *Arc élastique* 250k/1mq Voitures de 12T	1° Plateforme en béton armé, sur piles de 0m60 aux têtes, espacées de 3m80. 2° »

1. Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

SÉRIE Â' rle (> 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE *(Suite)*

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0m01² *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	FERMES Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	Cube de bois Poids de fer Dépenses par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité de surface utile S_p [3], de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Rocher solide » » »	Fixe *Sapin noir du Canada* Boîtes à sable en fonte	14 » 1m88 entre les fermes *51mm*	1062mc	0mc82		» » Septembre et octobre	t_c = 16mm9 t'_v 47mm2	Q = 9270mc (maçonnerie à mortier et béton) Q : S_p = 3mc70 Q : W = 0mc27 D = 580 000f D : S_p = 231f7 D : W = 17f2 D : Q = 62f6
Rocher Dabase résistant à 1600k) taille en gradins » Pression maxima : 23k9	Fixe *Pin* Billots et Coins	Étage supér : 21 Étage infér : 11 » » *150mm*	2000mc (1mc pour 2mc de voûte) » »	1mc24 » »	À pleine épaisseur 6 tronçons, 11 clavages	Tympans en construction *8 mois* Commencement de juillet	t_c 45mm t'_v 82mm	D = 614 742f (non compris abords et achats de terrains) D : S_p = 241f1 D : W = 14f8
Rocher (Grès) apparent » Pression : 5k »	Fixe *Pin (Bois rond)* Boîtes à sable Coins aux retombées	4 » 1m58 à la base *40mm*	75mc (sans le platelage) boulons 1182k boîtes à sable 192k sabots des pieux 200k 1578k 8100f	0mc35 7k3 37f5	2 rouleaux : Le 1er, par tranches séparées, d'abord des hautes, puis, entre elles, des basses ; le 2e, en 8 tronçons embrassant plusieurs tranches du 1er, séparés par 9 tranches minces	Pont achevé *92 jours* 15 décembre	t_c amont 30mm, aval 35mm t'_v = 0	Q = 626mc Q : S_p = 1mc86 Q : W = 0mc19 (Poids de métal armant la plate-forme et ses piles : 8t 4) D = 52537f D : S_p = 156f6 D : W = 15f6 D : Q = 83f9

2 Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

PONT	PROJET							
	ENSEMBLE		GRANDE VOÛTE					1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
			INTRADOS	ÉPAISSEURS		MATÉRIAUX	PRESSIONS en kg $\overline{0^{m}01^2}$	
PONT Date Symbole	*Longueur entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	CORPS Clef *Retombées*	TÊTES Clef *Retombées*	*Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	*Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Montanges** *France* 1908–1909 **Â**[1] Pte (> 40m) 12	*109m 49* 5mm RG / RD 62m25	6m,20 *5m 15* Pas de fruit 0m 58	Arc de cercle **80m,29** *20m465 (moyenne)* $\frac{1}{3,923} = 0,255$ *50m*	1m,50 *2m,50*	1m,50 *2m50*	Bandeaux : PT [1] Épaisseur 0m44 Longueur en douelle : 0m55 à 0m75 Lits grossièrement bouchardés Douelle et Queutage : L[1] Mêmes dimensions qu'en bandeaux (au moins 0m 250) Jusqu'à 9m91 de la clef, 2 moellons par assise : au-delà, 3 Calcaire de Villette-Romanèche (Ain) 1974k *Ciment artificiel Vicat n°1 de Vif (Isère)* *600k* *(250k à 300k à 28 jours)* *Sable de la Valserine* *Joints de 12mm* *Mortier avec très peu d'eau*	Pression maxima : Clef (Extrados) 43k8 Naissances (Intrados) 50k2 *Arc élastique* *Méthode analytique de M. Résal.* 2 locomotives de 33T Wagons de 16T	1° 11 voûtes transversales vues de 5m30 en plein cintre, sur piles de 1m06 aux naissances 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. 11, n° 6.

SÉRIE $\widehat{A}^1$ r[te] ($\geqslant 40^m$)

TABLEAU SYNOPTIQUE *(Suite)*

	EXÉCUTION								CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q — DÉPENSE D
	GRANDE VOÛTE								
	CINTRE								
	FERMES								
FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg : 0^m01^2 *Procédé*	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	**MODE DE CONSTRUCTION**	**DÉCINTREMENT** État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	**TASSEMENTS DE LA CLEF** sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v		Totaux et par unité de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17		18
Rocher calcaire, resistant à plus de 1000k » » »	Fixe *Sapin* Boites à sable Pistons en hêtre entourés de corde goudronnée Coins de secours en chêne	4 2.5^{cm} 1^m633 *160mm à la clef* *80mm au-dessus des piles*	568^{mc} 42595^k 98541^f	$1^{mc}07$ 80^k5 186^f3	3 rouleaux, le 2e, aux reins seulement. Au 1er roul.: 8 tronçons, 10 clavages. (2 clavages à la clef) Au 2e roul.: 6 tronçons, 6 clavages. Au 3e roul.: 8 tronçons, 10 clavages.	Voûtes d'évidement en construction, non clavées aux reins. *68 jours* 7 novembre	t_c amont 85^{mm} t_c aval 160^{mm} t'_v = $0^{mm}2$ à $0^{mm}4$		$Q = 2529^{mc}$ $Q : S_p = 3^{mc}72$ $Q : W = 0^{mc}09$ $Q : W' = 0^{mc}20$ [5] $D = 354\,950^f$ $D : S_p = 522^f9$ $D : W = 12^f0$ $D : W' = 27^f7$ [5] $D : Q = 140^f3$

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\widehat{A}^1$ r^{le} ($\geqslant$ 40m)

MONOGRAPHIES

PONT SUR L'ADDA, A TREZZO [1, 2] *(ITALIE - Lombardie)*

1370-1377
Détruit en 1416

$\widehat{A}^1$ r^{le} ($\geqslant$ 40m)1

1. Dates. — Entre 1360 et 1370 [3], Bernabò Visconti, duc de Milan, « *commença à reconstruire le château de Trezzo.. en même temps, il fit faire un* « *pont sur l'Adda, d'une seule arche.... avec deux tours de chaque côté. Ce grand* « *ouvrage fut achevé en 7 ans et 3 mois.* » (S'_3).

En 1416 [4], le condottiere Carmagnola, alors au service de Philippe Visconti, duc de Milan, assiégeait le château de Trezzo : comme la garnison recevait, du territoire de Bergame, des secours par le pont (S'_1), il affaiblit sa culée rive gauche (S'''_1), et le jeta par terre le 21 décembre (S_2).

Le pont n'aurait donc existé que 40 ans environ.

En 1775, pour faciliter la navigation, on fit tomber un morceau d'arc (S_6).

2. Le pont était d'une seule arche. — Andrea Biglia, chroniqueur milanais contemporain, l'affirme (S''_1).

Donato Bosso (S_2) et Bernardin Corio (S_3), nés plus de 40 ans après la chute du pont, disent que le pont détruit avait plusieurs arches. Mais le même Corio avait affirmé précédemment que le pont construit par Bernabò Visconti n'en avait qu'une (S'_3).

L'Adda coule, là, rapide et profonde ; au XIVe siècle, on n'aurait pas pu y fonder de pile [5] : on n'en voit aucun vestige (S'_5, S_6, S_9).

1. — Trezzo est sur le tramway Bergame-Vimercate-Monza, à 17km de Bergame.

2. — Après 1200, un seigneur de S. Gervasio, petit village en face de Trezzo, construisit en grosses pierres un pont d'une seule arche très pointue. Il fut coupé après 1275, puis refait vers 1279, puis détruit, probablement en 1320 (S_9, p. 24).

3. — Giulini précise 1370 (S'_1) : il semble que ce soit d'après Corio. Or Corio ne précise pas entre 1360 et 1370 (S'_3).

4. — Giulini (S''_1). D'après Corio, 1417 (S'_3).

5. — Pour traverser l'Adda, on a exécuté un grand arc métallique :
à Trezzo même, pour la route de Bergame (portée 62m50, - 1884-86) ;
en aval, à Paderno, pour le chemin de fer Bergame-Usmate, à 20k de Bergame (portée 150m, - 1887-88).

L'intrados des deux retombées, qui ont le même rayon [6], appartient au même arc.

Φ_1 — Vue d'ensemble — aval (S_8)



3. Ce qui reste de la culée rive droite (Φ_2, Φ_3 - S_8). — La douelle est cachée par la maçonnerie qui la soutient : on ne voit que les deux têtes.

La partie plate *ef* (f_3) est dans le plan du tympan ; *cd* est en recul de la saillie du cavet.

cd est en grès gris noir, assez tendre, très attaqué à la face Sud ; à la face Nord, il est moins creusé, mais a des fentes parallèles à la tête.

L'archivolte *def* est, par places, en grès jaune.

Biglia a écrit que l'ouvrage était en briques (S''_1).

Les têtes, les tympans, sont en pierre de taille de grès : on ne voit pas la douelle, ni le queutage.

6. — M. de Dartein. — Voir plus loin, n° 5.

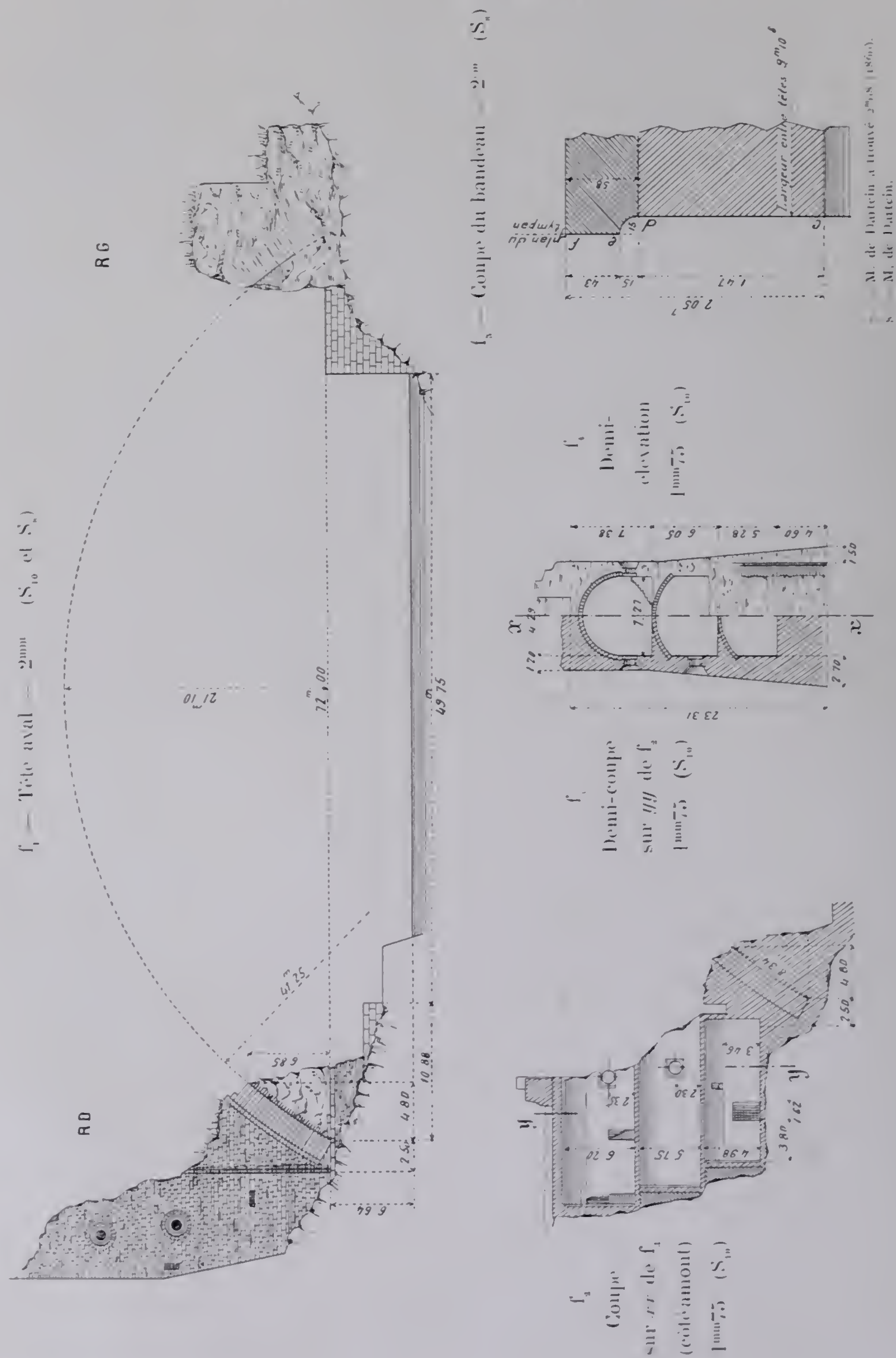
Culée rive droite — aval (S.)

Φ_2



Φ




f₁ — Tête aval — 2mm (S₁₀ et S₈)
RD
RG
21,10
72,00
41,25
6,85
6,64
2,50
4,80
10,88
49,75
f₃ — Coupe du bandeau — 2mm (S₈)
plan du tympan
Largeur entre têtes 9m10
2,05
1,47
,43
,15
f₂ Coupe sur xx de f₄ (côté amont) 1mm75 (S₁₀)
f₃ Demi-coupe sur yy de f₂ 1mm75 (S₁₀)
f₄ Demi-élévation 1mm75 (S₁₀)
23,31
7,38
6,05
5,28
4,60
1,50
2,70
1,70
4,29
7,27
6,70
5,75
4,98
2,30
3,46
3,80
1,62
2,50
4,80
M. de Dartein a trouvé 2m68 (1860).
M. de Dartein.

4. Ce qui reste de la culée rive gauche (Φ_4 - S_8). — On y devine l'appareil en voûte d'une retombée. « *Les ruines même ont péri* »[9].

Φ_4 — Culée rive gauche — aval (S_8)



5. Intrados. — M. l'Inspecteur Général de Dartein a relevé la portée : 72^{m}, — déterminé le rayon d'après les coordonnées de trois points de l'intrados, — puis, avec ce rayon, calculé la montée : 21^{m}10.

Comme le pont de Vérone[10], construit 20 ans avant, il était vraisemblablement en arc surbaissé (Trezzo : 1/3,41 ; Vérone ; 1/4,02). Comme lui, c'était un pont militaire : il assurait un passage entre le château (rive droite) et une tête de pont construite sur la rive gauche, peut-être un passage couvert (S'_3), peut-être, comme à Vérone, entre deux files de merlons.

9. — Quelques années avant 1886, on voyait encore sur les deux rives des restes assez importants des deux têtes avec leurs tours, et les retombées sur environ 4^{m} ; ceux de rive gauche ont en partie disparu par l'exploitation des carrières de poudingue (S_9, p. 28).

10. — $\widehat{A}^{II}$ r^{te} ($\geqslant$ 40^{m})^{1} - Tome III.

SOURCES :

S_1. — « *Historia fratris Andreæ Billii Patria Mediolanensis — Rerum Italicarum*

« *scriptores* » Muratori, tome XIX, Milan, MDCCXXI, Lib. III, col. 44 :

« *Ad Tricium... castra posita.....*

S'_1. — .... « *denique, cum videret Carmagnola non posse satis prohiberi, quo « minus in Castellum multa ex ponte trans Abduam commearent, statuit pontem « diruere.*

S''_1. — « *Opus ferme, cui nullum ejus generis par : quippe omnem gurgitis « amplitudinem uno fornice complexus altissimè tendebatur, nec quamvis lateritius « ullo ferro solvi poterat, super modum arctissima calcis coagmentatio. Castellum « olim cum ponte Bernabos extruxerat.....*

S'''_1. — « *Hunc pontem Carmagnola exteriore planta succisum diruit...* »

(Andrea Biglia, de Milan, de l'ordre des Augustins ; mort en 1435).

S_2. — « *Chronica Bossiana* » (Bibliothèque Nationale, Reserve K. 63 ; Milan MCCCCLXXXXII, non paginee :

« *Anno domini millesimo quadringentesimo sextodecimo...............................*

Pons Tricii « *Vigesimo primo decẽbris die Pons lapideus suppositus arci Tricii mirabili*

diruitur « *opere : pluribus q. fornicibus ex silice fabrefactus diruitur* ».

(Donato Bosso, historien milanais, né en 1456. — Biographie Michaud).

S_3. — « *L'historia di Milano volgarmente scritta dall' eccellentissimo oratore M. Bernar- « dino Corio, gentil'huomo milanese* », in Vineglia MDLIIII, Bibliothèque Nationale, K. 3101.

Corio cite des évènements de « *l'Anno mille trecento sessanta* » ; puis écrit,

S'_3. — page 243, verso :

Ponte sopra « *Et Bernabò diede principio alla riedification del castel di*

Adda fabricato « *Trezo. Similmente fece fare il ponte sopra il fiume Adda : que*

ĩ un solo arco « *sto fu fabricato in un solo Arco, che parse mirabil cosa, da*

« *ogni banda edificò due Torri, et si grande edificio fu compinto*

« *in sette anni, et tre mesi.*

Corio cite ensuite des évènements de janvier et fevrier 1370.

S''_3. — p. 312, verso. « *Poi l'Anno mille quattrocento diciasette.... il Duca.... « deliberò redurre in sua deditione la fortezza di Trezo... Il perche Filippo Maria gli « mandò Francesco Busoni di Cremagnola.......................................*

....

« *.....et il mirabile ponte, che già Bernabò Visconte in cinque archi sopra il vivo « sasso havea fatto fabricare fece roinare.....* »

Puis vient un évènement du 14 février.

(Bernardin Corio, 1459-1519, Milanais, chambellan du duc Ludovic Sforza, dit le More. Chargé, par lui, d'écrire l'histoire de Milan. — *Biographie universelle de Michaud,* tome IX).

S_4. — Giulini : « *Memorie spettanti alla storia, al Governo ed alla descrizione della città « e campagna di Milano.* » (Ouvrage publié en 1760-1765).

S'_4. — Vol. V, Lib. LXX, Anno 1370, p. 536.

S''_4. — Vol. VI, Lib. LXXIX, Anno 1416, p. 1416, p. 200, 201.

[d'après Biglia (S_1), Bosso (S_2), Corio (S_3)].

S_5. — G. B. Biadego : « *Del Ponte nuovo sull' Adige a Verona* ». — Vérone et Turin, 1885. (Memoria V, p. 279 et Pl. XX). Cette planche XX reproduit une restitution de M. de Dartein, lithographiée à Milan en 1860.

S'_5. — .... id......... Renseignements fournis à M. Biadego par l'Ingénieur Zucconi, de Milan.

S_6. — Luigi Ferrario : « *Borgo di Trezzo ed il suo Castello* ». Milan 1867. (M. Ferrario était secrétaire à la section historique et diplomatique des Archives de Milan).

S_7. — Hann et Hosking donnent une restitution peu vraisemblable du pont : « *as it* « *probably existed in 1390* » (*Theory, practice and architecture of bridges*) Londres 1839-1857, atlas, Pl. LXXI).

Croizette-Desnoyers reproduit, (*Construction des Ponts*, tome I, p. 41), cette restitution et celle de M. de Dartein de 1860.

S_8. — Ce que j'ai vu — juin 1908.

S_9. — Ing. Ariberto Crivelli : « *Gli Avanzi del Castello di Trezzo. L'Antico ed il Nuovo* « *Ponte sul l'Adda* », Milan, 1886. (Mémoire que m'a gracieusement communiqué M. le Professeur Jorini de l'Ecole des Ingénieurs de Milan).

S_{10}. — Les dessins f_1, f_2, f_3, f_4, sont faits d'après les relevés de M. l'Inspecteur Général de Dartein, qui m'a très gracieusement prêté ses minutes.

PONT DIT « PONT-Y-TU-PRIDD »[1]

SUR LA TAFE, PRÈS DE NEWBRIDGE (*PAYS DE GALLES, Comté de Glamorgan*)

Route de Lantrissent à Cardiff

1749–1750 $\widehat{\mathbf{A}}^1$ r^le (> 40m)2

1. Premier pont (1746-1748). — En 1746, un maçon, « *qui avait acquis* « *quelque réputation dans le pays* », William Edwards, construisit là un pont à 3 arches, qui fut emporté par une crue deux ans et demi après.

2. Deuxième pont. — Edwards devait, d'après son contrat, entretenir le pont 7 ans : il le reconstruisit avec une seule arche de 42m672 (140 pieds) d'ouverture et 10m668 (35 pieds) de montée ; mais, alors qu'il ne restait plus qu'à poser les parapets, la voûte, trop chargée aux reins, se souleva à la clef et s'écroula.

3. Troisième pont (pont actuel, terminé en 1750).

Φ₁ [2, 3]



1. — En gaélique : « Pont près de la butte de terre ».

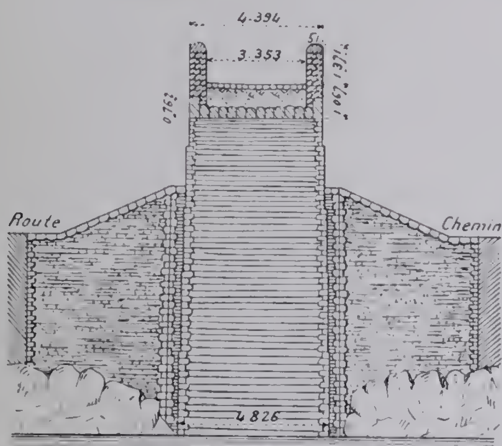
2. — Cliché de MM. T. Forrest et fils, Pontypridd.

3. — Photographie gracieusement communiquée, en juin 1907, par M. H. Waters, Agent général du « London and North Western » à Paris.

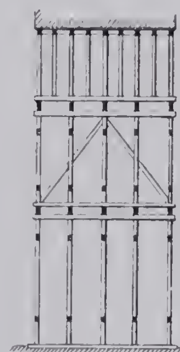
f_1 — Élévation — 2mm



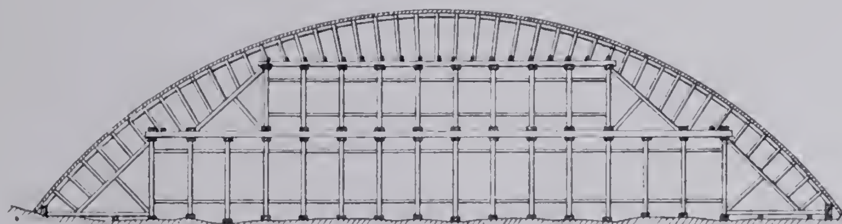
f_2 — Coupe en travers à la clef — 4mm



f_4 — Coupe en travers du cintre — 4mm [1]



f_3 — Cintre [1] — 2mm5



1. — D'après un modèle, qui a été conservé (S_1).

Sans perdre courage, Edwards la reconstruisit avec les mêmes dimensions ; mais, soit d'après les conseils de Smeaton qu'il avait consulté, soit instruit par son échec, il diminua la charge sur les reins :

1° – en élégissant les tympans par 3 voûtes annulaires ;

2° – en remplissant de charbon de bois l'intervalle entre les tympans.

Cette fois, la voûte a tenu :

Labor omnia vincit
Improbus,...

Vers 1818, on abaissa les rampes d'accès à 1/4.

4. Auteur : Edwards.

SOURCE :

S_1. — Institution of Civil Engineers — Minutes of Proceedings. 1846, p. 474, Pl. 40 à 43, n° 269 : « *Account of the Pont-y-tu-Pridd, over the River Tafe, near Newbridge, in the County* « *of Glamorgan* », Th. Macdougall Smith (Mémoire lu le 4 avril 1838).

PONT DE GROSVENOR, SUR LA DEE, A CHESTER *(PAYS DE GALLES)*

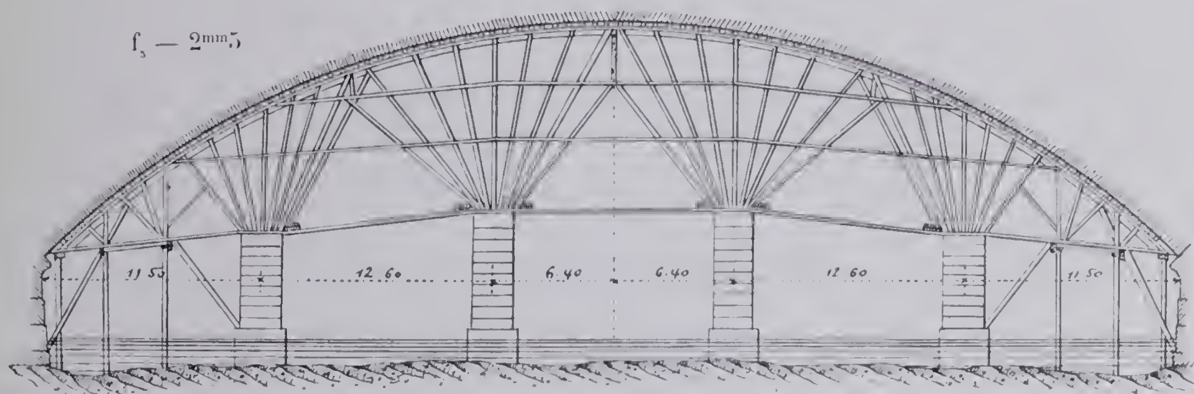
1833-1834 $\widehat{A}^{1}$ r^{te} (= 40^{m},3)

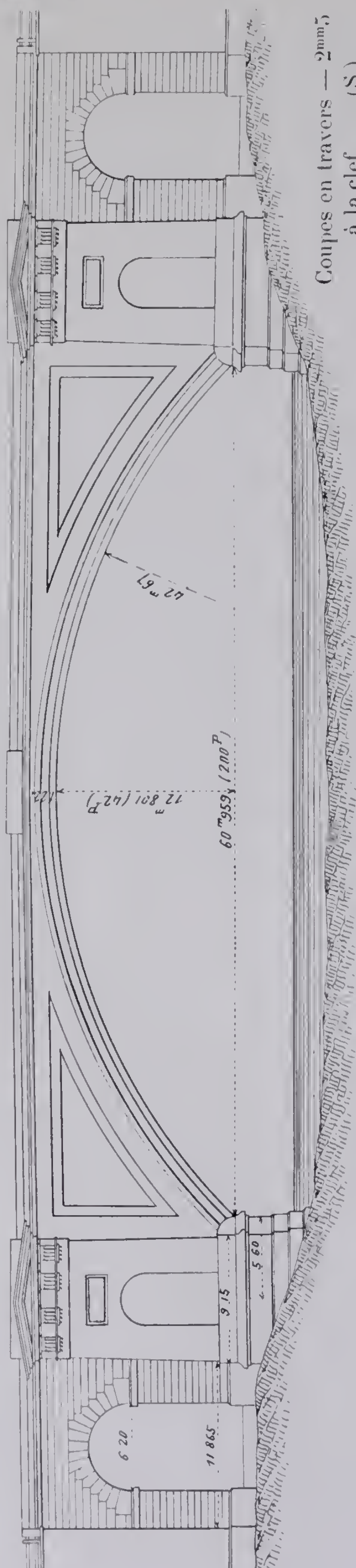
Φ_1 (S_3)



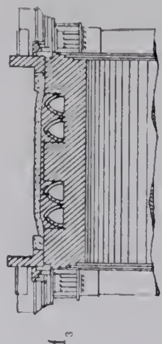
1. Cintre. — 6 fermes, à contrefiches isolées, disposées en éventail, portaient, par des sabots en fonte, sur 4 piles en maçonnerie. Elles étaient réunies en haut, suivant la courbe d'intrados, par deux cours de madriers de $0^{m}10$ chacun (S_2).

f_5 — $2^{mm}5$

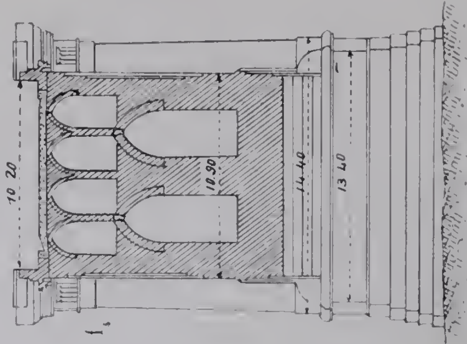




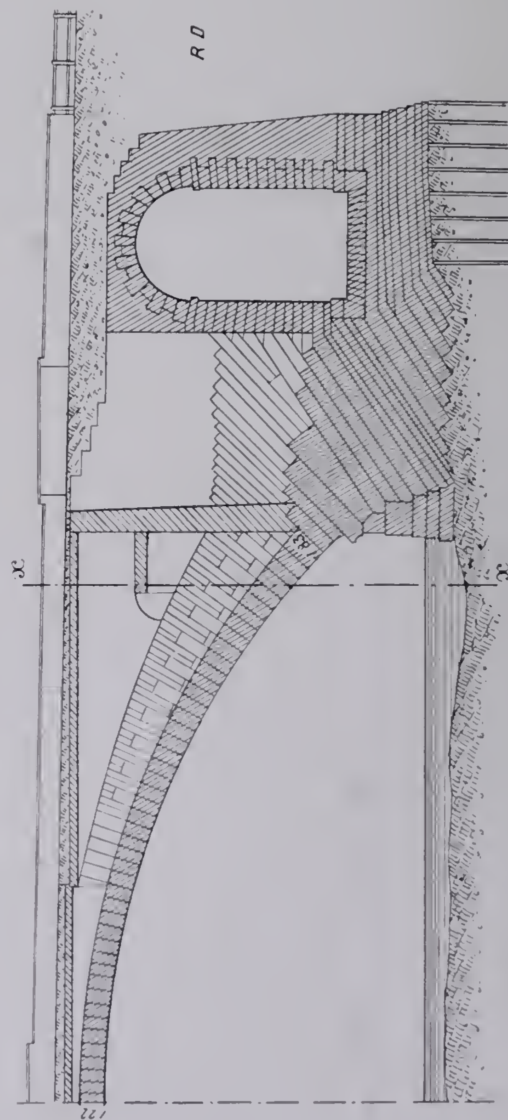
f₁ — Élévation — 2mm (S₂)



f₃ Coupes en travers — 2mm5 à la clef (S₂)



f₄ sur x x de f₂ (S₂)



f₂ — Coupe en long — 2mm5 (S₂)

Les couchis de 11^{cm} d'épaisseur, portaient sur des coins, — 2 sur chaque ferme, — de 0^{m}40 de longueur et 0^{m}25 à 0^{m}30 de largeur.

« *Le cintre était divisé en parties indépendantes correspondant à l'intervalle* « *entre les piles en maçonnerie. On pouvait, dès lors, décintrer par parties, en* « *particulier lâcher le cintre aux reins en le maintenant à la clef.* » (S_1).

2. Construction de la voûte. — « *La première assise au-dessus des* « *naissances fut placée sur un coin en plomb de 1 pouce 1/2* (38^{mm}) *d'épaisseur en* « *douelle, et finissant à rien à l'extrémité de son lit..... des bandes de plomb de 8 à* « *9 pouces* (20 à 23^{cm}) *de largeur furent aussi introduites dans les joints, de chaque* « *côté, en montant jusqu'au point où la pression put être considérée comme passant* « *de l'intrados à l'extrados des voussoirs, soit sur environ les 2/3 de la douelle...* » (S_1).

On descendit à la sonnette les voussoirs de clef, après avoir recouvert leurs faces d'une épaisse couche de mastic de céruse et d'huile, et après avoir garni les parois des contre-clefs de feuilles de plomb (S_2).

3. Décintrement (S_2). — On décintra lentement, le mortier étant encore mou, en tenant la clef haute et les reins bas.

4. Personnel (S_2).

Ingénieurs { *Projet :* M. Harrisson. — Le projet a été fait 25 ans avant l'exécution (S_1).
Exécution : M. Hartley. }

Entrepreneur : M. Trubshaw (auteur du projet du cintre).

SOURCES :

S_1. — Transactions of the Institution of Civil Engineers, vol. I, p. 207 et suivantes.

S_2. — École des Ponts et Chaussées. — Collection de dessins distribués aux Élèves. — Série 3, section A, Pl. 3. « *Pont de Chester* ». — Légendes explicatives des Planches. — Tome I, p. 70.

S_3. — Ce que j'ai vu — juin 1903.

PONT SUR LE TORRENT FEGANA, PRÈS DES BAINS-DE-LUCQUES[1]

(ITALIE, Province de Lucques)

Route Nationale de Livourne à Mantoue

{ 1845-1847
{ 1874-1877

$\widehat{A}^1$ r^te^ (> 40m) 1

Φ, (S,)



1. Pourquoi on a fait une grande voûte. — Le Fegana a des crues violentes, qui roulent de gros blocs : il emporta là un pont à deux arches, qui remplaçait un pont plus ancien.

Le rocher, qui est à une faible profondeur sur les rives, plonge presque à pic : on ne le trouve plus au milieu.

Il fallait là une grande arche.

2. Histoire. — L'ouvrage fut commencé en 1845. On construisit les deux culées jusqu'au-dessus des niches, et deux amorces de voûte sur 3m environ de chaque côté, soutenues par les murs d'un ancien pont.

A la révolution de 1847, on l'abandonna.

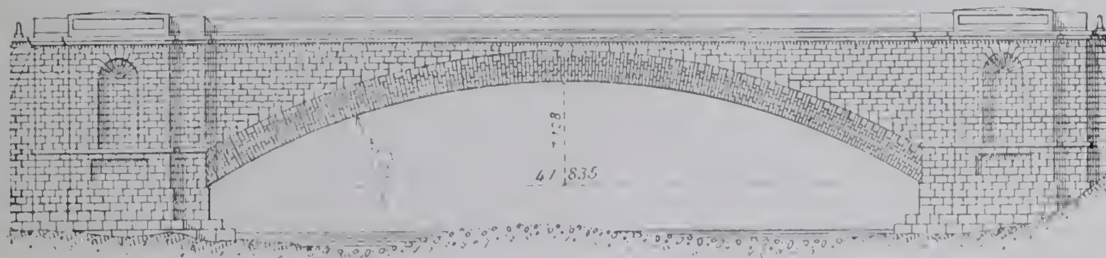
1. — Au point où le Fegana se jette dans le Serchio, à environ 3km des Bains-de-Lucques, 28km de Lucques.

On ne le reprit que 27 ans plus tard.

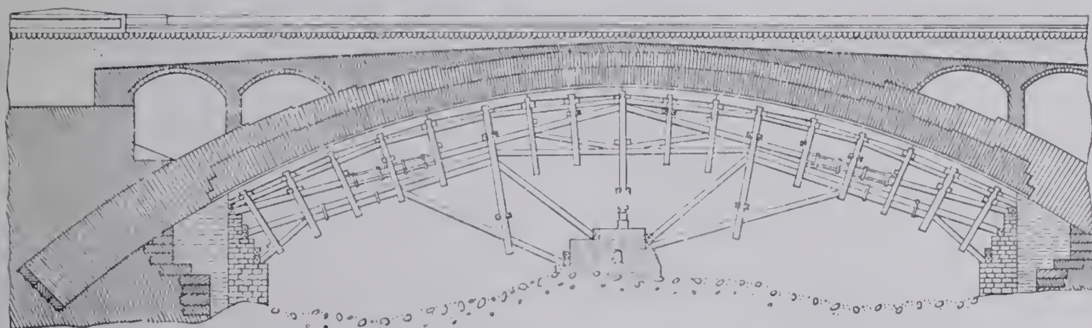
On respecta le projet primitif.

On élégit seulement les reins par deux voûtes transversales (f_2).

f_1 — Élévation — 2mm



f_2 — Coupe en long et cintre — 2mm5



a — Débris d'une ancienne pile

3. Couronnement convexe. — En élévation, les parapets et la plinthe ont une flèche de 0m08 pour ne pas paraître concaves.

4. Cintre (f_2). — Les pièces du cerveau du cintre portaient sur des caisses à sable ; celles des reins, sur des coins, qui ont mal fonctionné, et qu'il fallut ruiner.

5. Construction de la voûte. — On chargea le cintre à la clef, puis, le 31 août 1874, on commença le premier rouleau.

On mena d'abord en même temps les bandeaux et la douelle ; puis, pour hâter le clavage, on ne posa que le corps en briques, sans les bandeaux.

On changeait chaque jour de côté les équipes de maçons.

Près de la clef, on mit dans le mortier de la limaille de fer.

On termina le premier rouleau, ainsi réduit, le 6 octobre, et on commença, dès le lendemain, le deuxième, relié au premier par quelques harpes.

Aussitôt le deuxième rouleau terminé, on fit un premier décintrement partiel. Puis on chargea de briques l'emplacement à occuper plus tard par les bandeaux (anneau de 1^{m}20 à chaque tête).

On a donc opéré par rouleaux et par anneaux.

Voici la suite des principales opérations, et les tassements observés :

Opérations	Dates des observations	Abaissements de la clef en *mm.* totaux	partiels Cintre	partiels Voûte
On charge le cerveau du cintre d'environ 100.000 briques (220^T)	1874	40^{mm}	40^{mm}	
Construction du corps en briques. Clavage des rouleaux 1er	6 octobre	57.5	17.5	
Construction du corps en briques. Clavage des rouleaux 2e.	3 novembre	75	17.5	
Premier décintrement partiel	3 novembre	95		20^{mm}
Après le deuxième décintrement	1875 commencement de janvier	169		74
Troisième décintrement partiel, avant de commencer les bandeaux (on abaisse les 4 fermes intermédiaires en maintenant celles de tête)	fin avril	187		18
Exécution des bandeaux — Commencement	10 mai	187		
Exécution des bandeaux — Clavage (on relia les voussoirs des clefs avec ceux de la voûte par des crochets en fer plombés)	28 juillet	198		11
Quatrième décintrement partiel (Achèvement du décintrement)	août	200		2
Enlèvement en grand du cintre	9 août	210		10
Après la construction des tympans jusqu'à la plinthe		220		10
Après celle des parapets (1250^k par mètre courant de parapet)	commencement de novembre	230		10
	1876			28
	commencement de l'été	258	75	183

6. Fissures observées.

A. - Aux naissances. — Quand chaque attaque du premier rouleau avait environ 3^m, on constata à l'extrados du joint des naissances une ouverture « *presque capillaire* ». Quand on dépassa le milieu du demi-arc, soit à la 5e moise pendante à partir de la naissance, la fissure atteignit 13^{mm} et n'augmenta plus jusqu'au clavage du rouleau.

A mesure que se réduisait la charge de briques du cerveau, les fermes tendaient à se relever et la fissure à diminuer.

Pendant la construction du deuxième rouleau, elle augmenta de 2^{mm} et atteignit 15^{mm}.

B. - A la clef. — Au décintrement final du 9 août 1875, on observa à la clef un fil à peine perceptible, — la fissure des naissances n'augmentant pas.

7. Composition de la voûte.

	Cube	Pour 1^{mc} : Journées de maçon	Pour 1^{mc} : Journées de tailleur de pierre	Le mc. de voûte est ainsi composé :
Corps en briques, exécuté d'abord sans les bandeaux	604^{mc}64	0 j 93	»	Briques ..... 0^{mc}783 Mortier ..... 0^{mc}217 (Poids moyen : 1751^k)
Têtes en pierre de taille ..... 141^{mc}89 Liaisons en brique .... 93^{mc}50	235^{mc}39	1 j 02	1 j 4	
Total	840^{mc}03			

8. Personnel.

Ingénieurs :

Projet : Nottolini, de Lucques.[3]

Travaux : de 1845 à 1847 : Nottolini ; de 1874 à 1877, MM. Giulio Marzocchi, Ingénieur en chef, Salvi, Ingénieur de section et Cappello, Ingénieur adjoint.

Entrepreneur : M. Alexandre Mugnaini.

3. — Architecte et Ingénieur distingué. Auteur de l'aqueduc de Lucques (459 arches), du projet du pont suspendu sur la Lima à Fornoli près des Bains-de-Lucques. Mort en 1851.

SOURCES :

S_1. — Giornale del Genio Civile : Gennaio 1878, p. 33 a 54, Tav. III e IV ; Febbraio 1878, p. 81 à 109. « *Ponte sul torrente Fegana nella provincia di Lucca* », Relazione del cav. Giulio Marzocchi, Ingegnere Capo del Genio Civile.

S_2. — Ce que j'ai vu — octobre 1906.

PONT SUR LE DRAC, A CLAIX[1] *(ISÈRE)*

Route Nationale n° 75 de Châlon-sur-Saône à Sisteron

1873-1874 $\widehat{\mathbf{A}}^1$ r^{te} $(\geqslant 40^{\mathrm{m}})^5$

Φ_1 (S_2)



1. Aspect (S_2). — C'est un arc à culées perdues.

Il est accolé au pont de Lesdiguières[2] : il en est comme la corde. Ces deux ponts, trop voisins, se font tort.

Le parapet est en grandes pierres de taille debout : au-dessus de cet arc très tendu, à tympans en moellons bruts, un léger garde-corps eût mieux convenu.

Le parapet et la plinthe ont noirci.

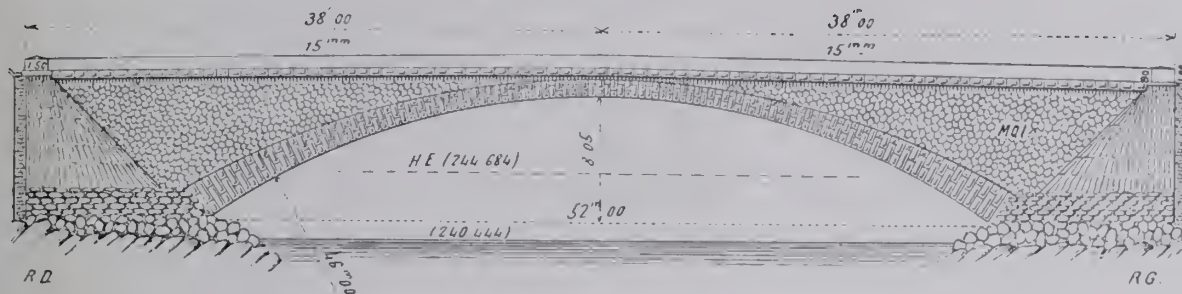
La plinthe, en forte saillie, a bien protégé les têtes.

2. Cintre. — *A. - Appui en rivière.* — Le cintre s'appuyait du côté de la rive droite, sur un caisson sans fond, échoué sur le gravier, rempli de béton, qui était à mortier de ciment sur les 3/4 de la hauteur, et, pour le reste, à mortier bâtard de chaux et ciment.

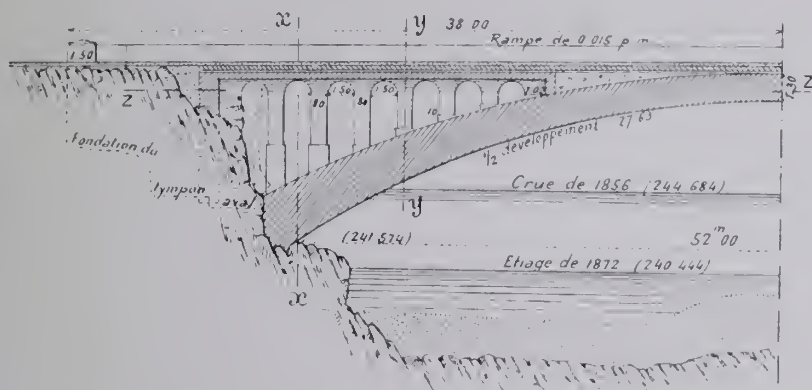
1. — A 8^{km} au sud de Grenoble.

2. — $\widehat{\mathbf{A}}^1$ r^{te} $(\geqslant 40^{\mathrm{m}})^4$ — Tome II.

f1 — Élévation aval — 2mm

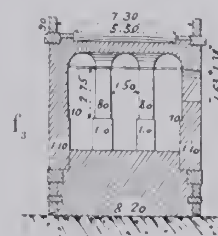


f2 — Coupe en long — 2mm5

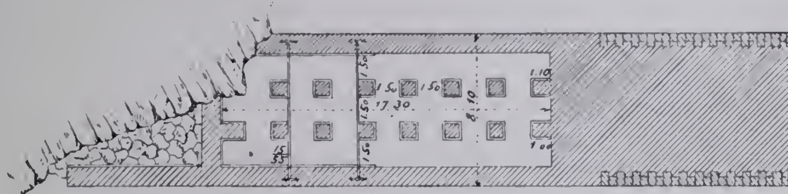


Coupes en travers

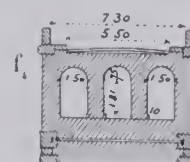
sur xx de f2



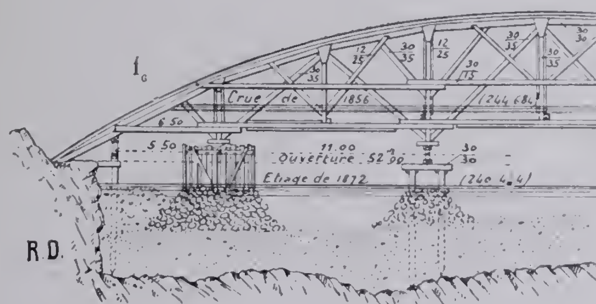
f5 — Coupe horizontale sur zz de f2

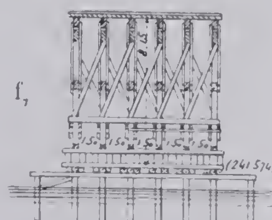


sur yy de f2



Cintre — 2mm5





B. - Dépenses (supports compris) :

Appuis	Dragages et déblais	2.326f78	7.707f98
	Maçonnerie	3.780f64	
	Enrochements	1.600f56	
	Charpente		5.562f33
Cintre proprement dit			19.264f63
	Ensemble		32.534f94

3. Fondations. — On a taillé le calcaire schisteux tendre par redans parallèles aux lits des naissances, et rempli tout l'espace entre le rocher et les naissances de maçonnerie de moellons de choix à mortier de ciment.

4. Exécution de la voûte. — On l'a construite du 20 janvier au 26 février 1874, en deux rouleaux, chacun en 4 tronçons d'égal volume (S_2), commençant aux naissances et à 16^m63 de la clef, exécutés en même temps.

Aux naissances, on a posé sur cales les deux premiers voussoirs de tête (S_2) ; entre eux, on a fait une maçonnerie provisoire à pierres sèches ; les deux autres tronçons étaient sur des taquets.

Après le clavage du rouleau à la clef et aux reins, on remplaça la maçonnerie à pierres sèches des naissances par de la maçonnerie pleine.

Pendant l'exécution, on changeait, au moins une fois par jour, l'emplacement des équipes de maçons « *afin de ne pas accumuler sur la même partie les défauts* « *qui auraient pu être particuliers à chaque ouvrier.* »

On a clavé : le premier rouleau, aux têtes le 31 janvier, sur le reste le 3 février ; le deuxième, le 27 février 1874.

Pour empêcher le mortier de ciment[3] d'arriver à fleur de pierre, en douelle ou aux têtes, on a garni les joints vus, sur 2^{cm}, de plâtre qu'on a gratté ensuite facilement.

Il a fallu 440 journées de maçon pour faire $827^{mc}210$ de maçonnerie (voûte), soit $1^{mc}9$ par journée.

5. Décintrement. — La voûte, clavée le 27 février 1874, a été décintrée le 10 avril, 42 jours après. On avait, la veille, substitué aux billots des boîtes à sable. L'opération a duré 20 minutes.

6. Dépenses.

Cintre			32.534f94
Maçonnerie de la voûte	Moellons		45.435f40
	Pierre de taille		11.207f71
Tympans, voûtes de décharge, murs et béton de remplissage			26.757f42
Bandeaux en pierre de taille		7.015f49	15.208f35
Bahuts en pierre de taille		8.192f86	
Trottoirs, rigoles, perrés et abords			8.419f87
			139.563f69

3. — Le mélange : sable 1^{mc} ciment artificiel Vicat n° 1 : 1000^k, eau : $0^{mc}363$, donnait $1^{mc}36$ de mortier.

7. Mouvements dûs aux variations de température.

A. - Observations faites par M. Cendre, avant 1879 (S_1). — A la plinthe, au-dessus de la clef, on a constaté 0^{m}007 pour un écart de 52° (de — 7° à + 45°) ; 9 fissures dans le parapet et la plinthe, se rouvrant chaque hiver et se refermant l'été : une de chaque côté de l'axe et sur chaque tête, à 27^m environ de part et d'autre de la clef ; aucune dans la voûte.

On a observé aussi quelques légères fentes dans les tympans.

B. - Observations faites, sur ma demande, par les soins de M. l'Inspecteur Général Rivoire-Vicat, en septembre 1 ,08.

Joints ouverts

Tête amont		Tête aval	
Rive gauche	Rive droite	Rive droite	Rive gauche
Les 5 premiers du parapet et de la plinthe.	Du 2e au 6e et le 8e du parapet. La plinthe est recouverte de terre.	Les 6 premiers et le 8e du parapet ; le 5e de la plinthe.	Le 5e du parapet et de la plinthe.
Le joint du parapet à la clef. La plinthe est couverte de boue.			

Pas de fissures dans les tympans.

8. Personnel (S_2).

Ingénieurs :

Projet. — en chef, M. Berthier ; — ordinaire, M. Pasqueau.

Exécution. — en chef, M. Gentil.

ordinaires : jusqu'au 15 octobre 1873, M. Pasqueau, ensuite, M. Cendre.

Entrepreneurs : MM. Muguet frères.

SOURCES :

S_1. — Annales des Ponts et Chaussées, 1879, 1er semestre, p. 5 à 27. Pl. I : « *Notice sur la* « *construction du pont de Claix* », par M. Cendre, Ingénieur des Ponts et Chaussées.

S_2. — Exposition, Paris, 1878. — Notices, Travaux Publics, p. 8 à 13 : « *Pont de Claix* « *sur le Drac* ».

S_4. — Ce que j'ai vu — juin 1908.

Ce qui n'est pas spécifié S_2 est de S_1.

PONT DU SAULNIER *(LOZÈRE)*

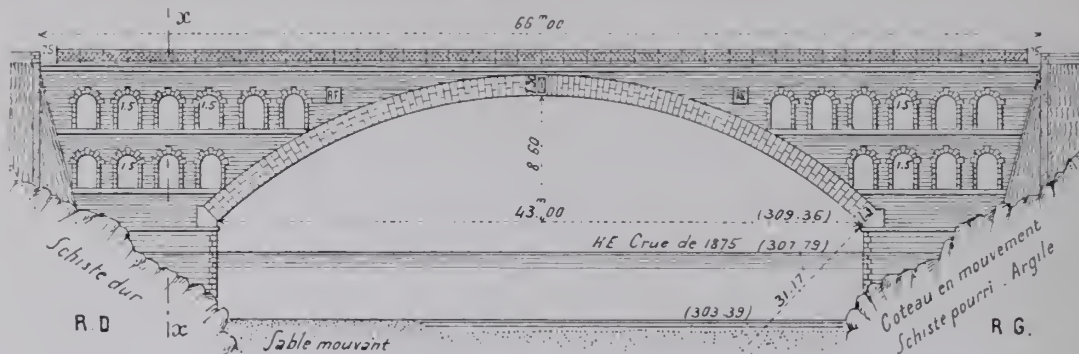
SUR LE GARDON DE SAINTE-CÉCILE D'ANDORGE [1]

Chemin de Grande Communication n° 13 de Florac à Alais

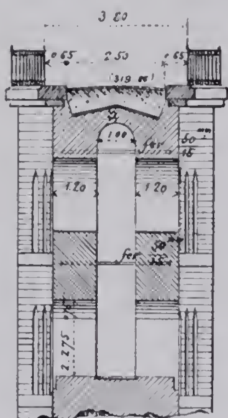
1882
écroulé en 1912

Â[1] 1[re] (= 40m,6)

f_1 — Élévation aval — 2mm (S_1)



f_2 — Coupe en travers sur xx de f_1 — 5mm



1. Pourquoi on a fait une grande voûte.

On n'a pas adopté un pont à deux arches, parce que la pile eût dû être fondée à 13m. On voulait, d'ailleurs, exagérer le débouché, parce que, depuis la destruction des forêts qui protégeaient le sol, le Gardon exhausse rapidement son lit.

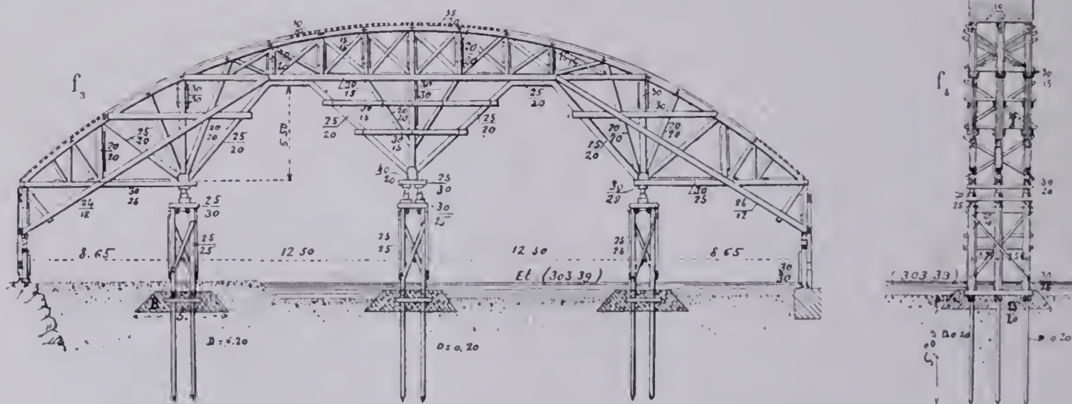
2. Cintre.

— Les trois appuis en rivière reposaient sur des massifs de béton coulé sur des pieux de 5m de fiche.

Le cintre a été taillé et monté, en 4 semaines, par 6 charpentiers.

Cintre — 2mm5

f_3 f_4



1. — A 1k1 en amont du Collet de Dèze, à 8k3 en amont de Sainte-Cecile d'Andorge, au raccordement du Chemin de grande communication n° 13 à la Route nationale n° 107 bis.

3. Fondation de la culée rive gauche (26 juin - 9 août 1882). — La culée rive gauche devait reposer, à $1^{m}50$ sous l'étiage, sur gravier compact. Le sol de fondation était protégé contre les affouillements par deux enceintes de pieux et palplanches, entre lesquelles on a coulé du béton sur $1^{m}30$ de hauteur.

4. Exécution de la voûte (21 août - 4 octobre 1882). — Voici les dates et durées d'exécution :

	Commencement	Achèvement	Durée d'exécution en jours
Rouleaux (épaisseur moyenne à la clef : $0^{m}65$) 1er	21 août	9 septembre	18j
Rouleaux 2^e^	9 septembre	25 septembre	16
Remplissage aux reins	25 septembre	4 octobre	9
		En tout	43j

Les joints des premières assises de voussoirs ont été garnis d'étoupe sur 5^{cm} à l'intrados.

Quand les 1er et 2e rouleaux sont arrivés près de la clef, on les a clavés provisoirement au moyen de pièces de bois pour soulager le cintre.

Pendant la construction, le cintre n'a pas tassé.

5. Décintrement. — On l'opéra en trois fois :

Dates (1882)	Abaissements du cintre en *mm*	Mouvements de la voûte
11 octobre	10	La voûte suit le cintre, sauf aux naissances.
14 octobre	30	Le 14 au soir, la voûte est détachée sur 17^{m}, de chaque côté, à partir des naissances ; le lendemain, sur 11^{m} seulement.
4 novembre (39 jours après le clavage du 2e rouleau)	35	La voûte se sépare complètement.

Le tassement total de la voûte a été de 52^{mm}.

On n'y a constaté ni fissure ni écrasement (S_1).

6. Mouvements postérieurs au décintrement.

A. — Mouvements de la culée rive gauche. — Le coteau qui porte la culée rive gauche (schiste pourri et argile bleue mouillée), s'est avancé à chaque crue du Gardon [2] (S_2).

La culée rive gauche a marché avec lui, le haut plus vite que le bas. En mai 1909, son parement antérieur était en surplomb de 9^{cm} (S_3) ; à la naissance, il était 14^{cm} plus bas que le projet.

La culée rive droite, fondée sur du schiste en place, n'a jamais bougé.

2. — Le mouvement s'étendait, fin 1908, à plus de 300^{m} en plan. La Route nationale n° 107bis était deformée et, pour fonder le mur du chemin de fer le long de cette route, on est descendu à 14^{m} sans trouver le solide (S_2).

B. — Déformations de la voûte. — La culée rive gauche s'avançant vers la culée rive droite, la portée diminuait : au niveau des naissances, elle était de 42m80 en novembre 1907 après les grandes pluies d'automne (S_2) ; de 42m68 en mai 1909 (S_3), de 42m65 en juin 1911 (S_4), soit, par rapport au projet, une réduction de 0m35 [3].

Φ_1 — amont (2 septembre 1908) (S_6)



Le dessous de la clef était, en mai 1909, de 0m53 plus haut qu'au projet [4].

Il s'est élevé :

de 19cm du 15 mars 1908 au 9 février 1911.

de 8cm du 5 avril 1911 au 5 juin 1911.

Si la clef a été placée à la cote du projet, elle aurait été, à cette date, plus haute de 75cm.

3. — Un accident analogue se serait produit à un pont en maçonnerie sur l'Alento (Italie), route de Bucchianico à Chieti, construit en 1896 : pont en arc de 18m d'ouverture, 4m50 de flèche ; voûte en briques de 0m95 à la clef, 1m40 à l'imposte, fondé sur des couches alternées d'argile et de sable.

Deux années après la construction, une culée s'étant avancée vers la rivière, la clef se souleva ; la voûte se fendit : l'ouverture se réduisit à 17m74 à l'amont, 17m77 à l'aval.

Ce pont remplaçait un pont en maçonnerie à 3 arcs de 6m, construit au même point en 1850, et qu'on dut interdire à la circulation à cause des déformations de la voûte.

(Revista de Obras Publicas, 30 novembre 1905 : « *Accidente ocurrido en un puente de fabrica sobre el rio Alento* »).

4. — Dès 1892, on a constaté un relèvement de la voûte (S.).

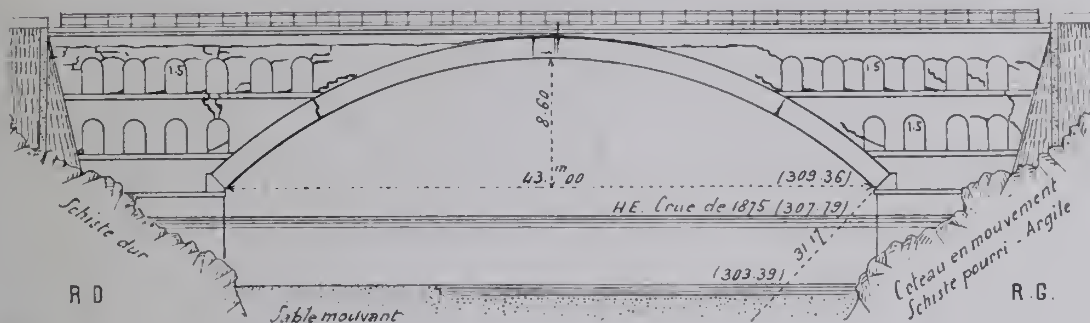
En septembre 1908, la voûte; à la clef, était ouverte à l'extrados et s'écrasait à l'intrados.

Aux reins, elle était ouverte à l'intrados.

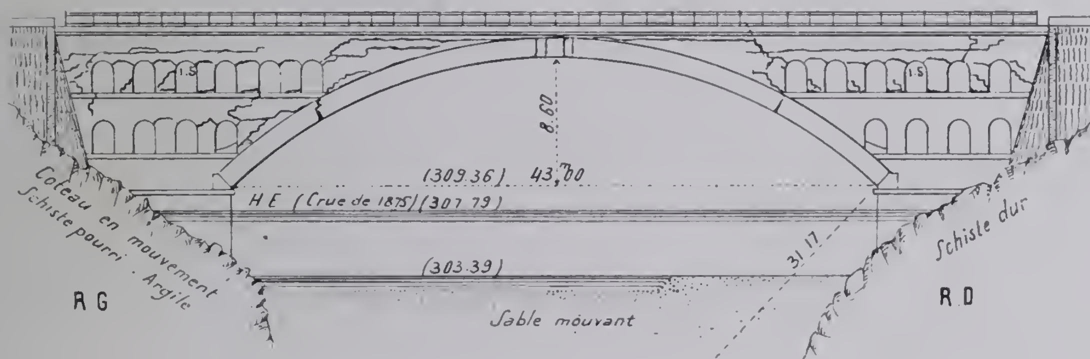
A ces deux points, il n'y avait plus, pour faire passer la pression, qu'une fraction fort réduite de l'épaisseur (environ le 1/3 à la clef, la moitié aux reins, — autant qu'on en pouvait juger d'en bas) (S_6).

État du Pont - décembre 1908 — 2ᵐᵐ (S_2)

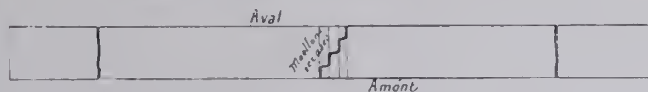
f_5 — Aval



f_6 — Amont



f_7 — Projection horizontale de la douelle



C. — Déformations des tympans (S_2, S_4) - (Φ_1, f_5, f_6). — Les tympans étaient coupés de longues fentes horizontales.

Les voûtes d'évidement, surtout celles de l'étage supérieur rive gauche, s'étaient ouvertes aux reins, et leurs pieds-droits s'étaient inclinés : il y avait, à leur pied, des ouvertures atteignant 9ᶜᵐ (S_4).

Les parapets étaient déformés.

7. Chute du Pont (28 janvier 1912). — Le 19 décembre 1911, 3 assises de douelle se détachèrent, au milieu de la demi-voûte rive gauche (S_2).

40 jours après, le 28 janvier 1912, à 2 heures du matin, le pont s'écroula.

Φ_2 — amont (6 février 1912)



Voici les mesures faites après la chute (S_3) :

	Naissances		Socle	
	amont	aval	amont	aval
Distance entre culées..............	42^m60	42^m57	42^m67	42^m64
Réduction par rapport au projet (43^m).	*0^m40*	*0^m43*	*0^m33*	*0^m36*

Surplomb des naissances sur le socle (culée rive gauche) : 7^cm.

Les fissures des tympans au-dessus des culées se sont refermées (S_3).

8. Ingénieur. — *Projet et Travaux :* M. A. Charpentier, Agent-Voyer en chef.

SOURCES :

S_1. — Annales des Chemins Vicinaux, tome XXXIX, 1883, p. 3 à 25, Pl. I et II : « *Notice « sur la construction d'un pont en maçonnerie au Saulnier, près le Collet de Dèze, sur le Gardon « de Sainte-Cécile d'Andorge* ». M. A. Charpentier, Agent-Voyer en chef de la Lozère.

Cette même notice a paru dans le Portefeuille des Conducteurs des Ponts et Chaussées, 1883, 18e série, nos 2 et 3, p. 5 à 9, Pl. 3 et 4.

Relevés qu'ont gracieusement fait faire, sur ma demande :

S_2. — en décembre 1908, M. Chevalier, Ingénieur en chef des Chemins de fer Départementaux.

S_3. — en mai 1909, M. Thibeaud, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées à Mende.

Renseignements qu'ont bien voulu donner :

S_4. — à M. Thibeaud, M. Nosley, Conducteur principal des Ponts et Chaussées à Florac (février 1912) ;

S_5. — à M. Mense. Ingénieur de la Compagnie PLM à Alais, M. Michel, Agent-Voyer au Collet de Dèze (février 1912).

S_6. — Ce que j'ai vu, septembre 1908.

S_7. — Renseignements qu'a bien voulu m'adresser M. Michel (novembre 1912).

Tout ce qui est sans indication de source, est de S_1.

PONT SUR LA BLACK RIVER, A ELYRIA *(ÉTATS-UNIS – Ohio)*

1886 $\widehat{A}^1$ r^{te} ($>40^m$)$^{\bar{7}}$

Φ_1 (S_1)



I. Personnel.

Ingénieur : M. E. C. Kinney, alors Ingénieur en chef adjoint à l'« Union Pacific Ry ».

Entrepreneur : M. John Weller.

SOURCE :

S_1. — Renseignements et photographie que M. Ralph Modjeski, « Consulting Engineer » à Chicago, a bien voulu demander à M. Kinney (mai 1909).

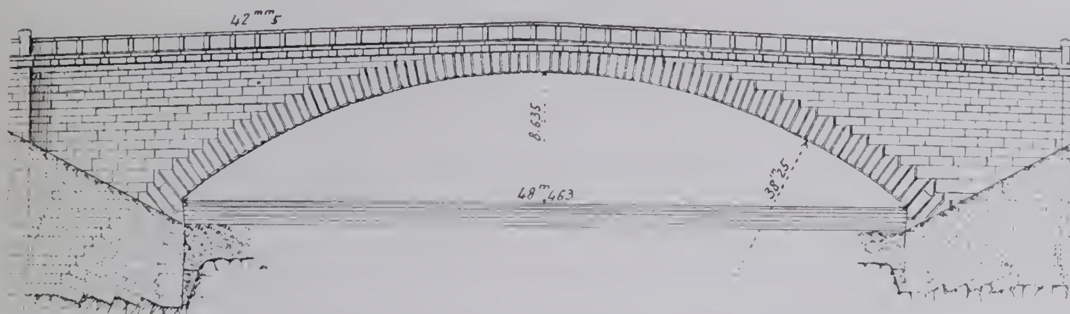
Dans l'« Engineering News » du 31 mai 1890, p. 506, M. Kinney donne une courte description du pont.

PONT DE LA MAIN STREET, SUR LE WHEELING CREEK,

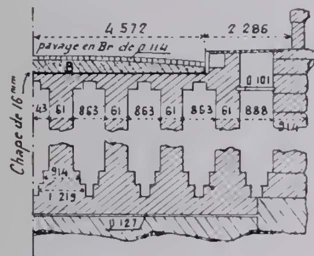
A WHEELING *(ÉTATS-UNIS – West Virginia)*

1891-1892 $\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ 1re ($> 40^{m}$) 8

f_1 — Élévation — 2^{mm}

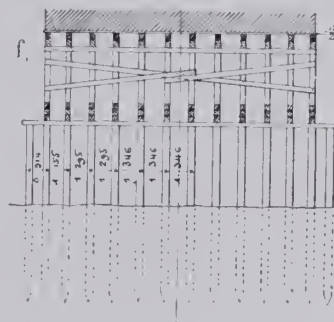


f_2 — Demi-coupe en travers — 5^{mm}

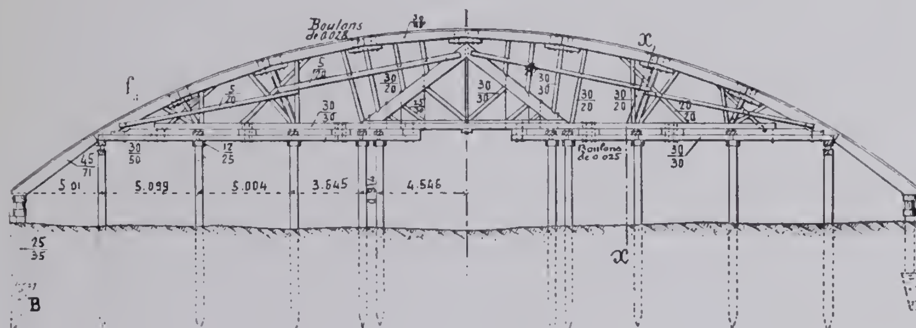


Cintre

Coupe en travers sur xx de f_3 — $2^{mm}5$



Cintre — Élévation — $2^{mm}5$



Φ_1



1. Personnel.

Ingénieurs : MM. Hoge et White.
Entrepreneurs : MM. Paige, Carey et Cie.

SOURCES :

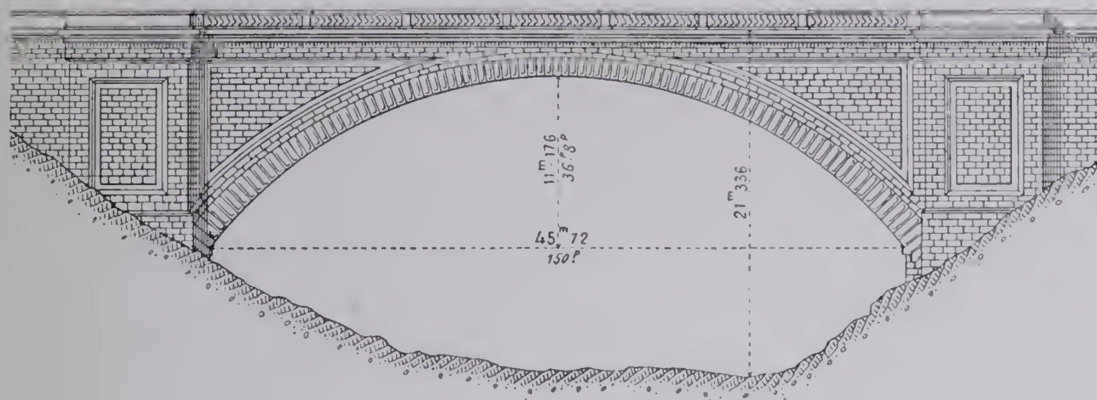
S_1. — Dessins d'exécution, photographie et renseignements, gracieusement communiqués, en mai et juin 1908, par M. Malverd A. Howe, M. Am. Soc. C. E., Directeur du « Department of Civil Engineering and Architecture » du « Rose Polytechnic Institute » à Terre-Haute (Indiana).

PONT DE BELLEFIELD, SUR LE CREUX DE SAINT-PIERRE,

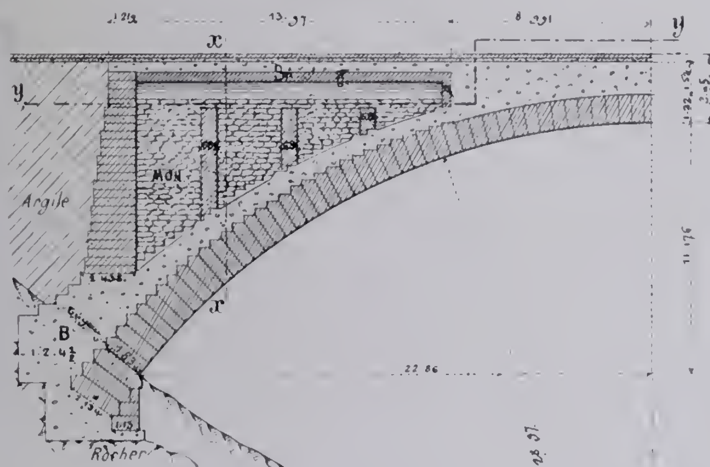
A PITTSBURG[1] *(ÉTATS-UNIS, - Pennsylvanie)*

1896-1897 $\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ P^{le} (= 40^{m},9)

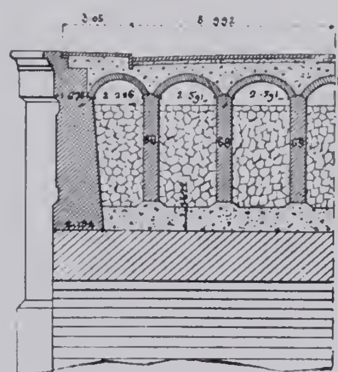
f$_1$ — Élévation[2] — 2^{mm}



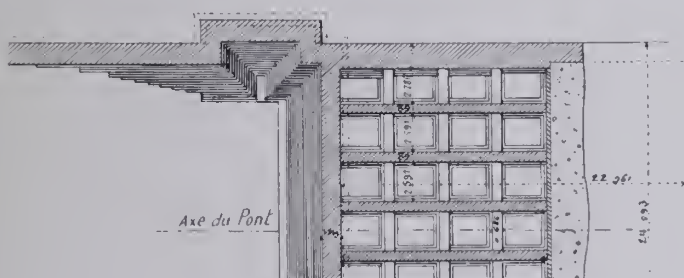
f$_2$ — Coupe en long — 3^{mm}



f$_3$ — Coupe en travers sur xx de f$_2$ — 3^{mm}



f$_4$ — Coupe horizontale sur yy de f$_2$ — 2^{mm}



I. Matériaux de la voûte (f$_2$, f$_3$). — La douelle et les bandeaux sont en pierre de taille de 1^{m}219 à la clef, 1^{m}829 aux retombées.

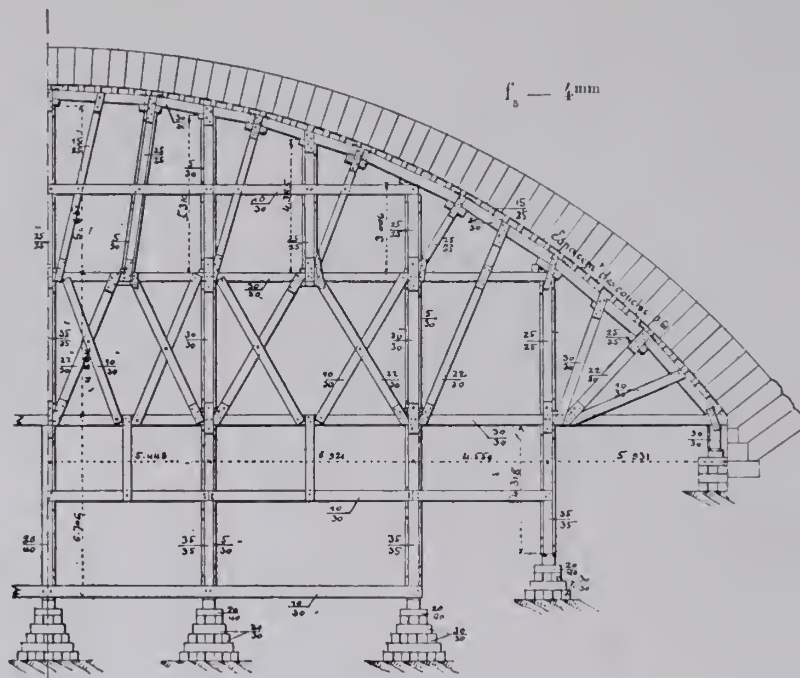
Sauf sur 2^{m}13 à partir de chaque tête, la douelle porte un 2me rouleau en béton.

1. — A l'entrée principale du Parc Schenley.

2. — Restituée d'après une photographie (S$_1$ - p. 540).

2. Chape. — Sous le pavage en bois de 30^{cm} d'épaisseur, est une chape en asphalte de 16^{mm}, sur une chape en mortier de ciment Portland de 25^{mm}.

3. Cintre. — L'about inférieur des poteaux, arrondi, s'engage dans des boîtes à sable en fonte.



La partie supérieure des boîtes est garnie de ciment pour conserver sec le sable.

Il n'y a pas de platelage. Chaque assise de voussoirs repose sur un couchis.

Les vaux sont assemblés au sommet des poteaux par des plaques de tôle. Leur extrados n'était pas en courbe ; on a dû, après décintrement, retailler nombre de voussoirs.

Au moment de commencer la voûte, les fermes furent mises exactement à leur place au moyen de coins en chêne.

4. Fondations. — Les culées sont en béton (1 volume de Portland, 2 volumes de sable de rivière, 4 volumes 1/2 de pierre cassée à 5^{cm}) ; sur le béton, 3 assises de libages.

5. Exécution de la grande voûte. — L'extrados de la douelle a été laissé très irrégulier, pour bien lier la pierre au béton.

« *Pendant la construction.., le cintre s'affaissa et provoqua plusieurs fissures....*
« *L'une traversait l'arche d'une tête à l'autre, entre la 12e et la 13e assise de chaque*
« *côté ; une autre s'étendait de chaque côté, entre la 20e et la 23e ; de plus, il y eut,*
« *d'un côté seulement, 3 fissures plus courtes au-dessous des reins à une distance*
« *de 16 à 26 pieds* (4^m87 à 7^m92) *en arrière des têtes. Les fissures avaient une largeur*
« *de 1/16 à 5/32 de pouce* ($1^{mm}5$ à $3^{mm}7$) *et furent soigneusement cimentées avant le*
« *décintrement.* » (S_1).

L'arche fut commencée à la fin de 1896, reprise en juin 1897, achevée le 18 septembre 1897.

6. Décintrement. — Du 30 septembre au 12 octobre 1897, on enleva graduellement le sable des boîtes, en commençant par les palées centrales.

7. Quantités.

Pierre de taille pour voûte	1.874^{mc}
Maçonnerie 1er choix	2.927
Maçonnerie ordinaire	1.462
Briques	300
Béton de ciment Portland	2.397
Béton de ciment naturel	310
Total	9.270^{mc}

8. Personnel.

Ingénieurs :

Projet et exécution : M. Henry B. Rust, M. Am. Soc. CE.

Directeur des travaux : M. E. M. Bigelow, M. Am. Soc. CE.

Entrepreneurs : MM. Neeld et Foley.

M. A. D. Neeld a fait le projet du cintre.

SOURCE :

S_1. — Engineering Record, 9 juin 1900, p. 540 et 541 : « *The Bellefield stone arch bridge,* « *Pittsburg.* »

PONT FRÉDÉRIC-AUGUSTE

SUR LA VALLÉE DE LA SYRA, PAR-DESSUS UNE PLACE

A **PLAUEN** *(SAXE, - Voigtland)*

1903-1905 $\widehat{A}^1$ I^{te} ($\geq 40^m$) 10

Φ_1 ($S^{..}_1$)



1. Pourquoi on a fait une grande voûte. — Le pont est entre deux manufactures qui empêchent de le voir : la vallée n'est vide que sous lui, et ce vide n'est que très partiellement occupé par des chemins.

On n'y voit pas de ruisseau.

Les lieux ne paraissent pas imposer, — ni même demander, — une voûte de 90m.

On l'a voulue.

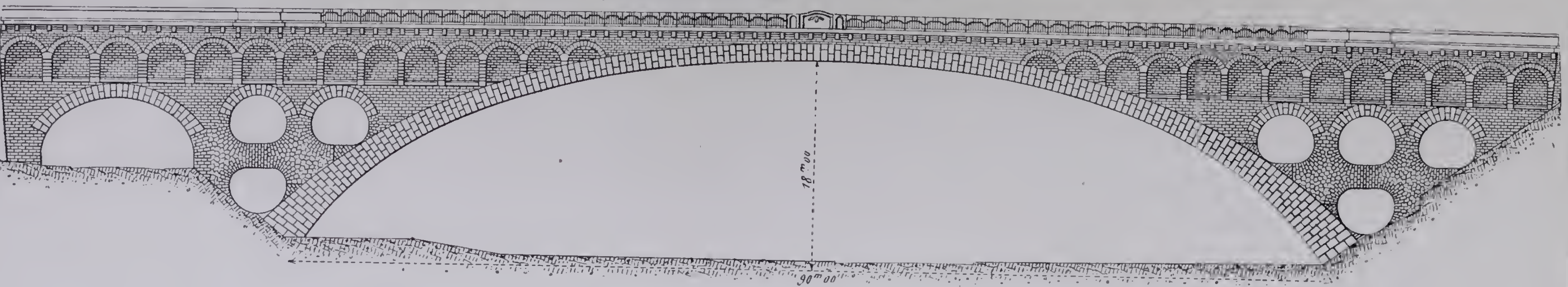
2. Pourquoi on n'a pas articulé la voûte (S_2). — On n'a pas mis de rotules :

1° - parce qu'on n'était pas sûr de leur bon effet ;

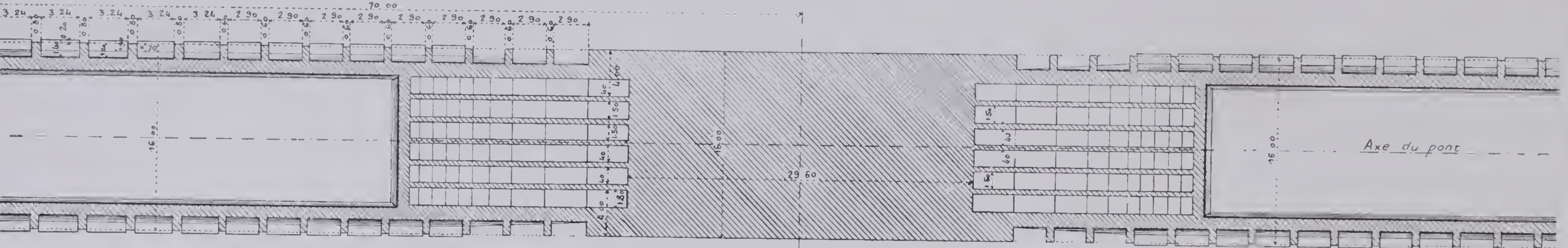
2° - parce que les clavages multiples devaient assurer à la voûte, jusqu'à la fin de sa construction, une souplesse suffisante ;

3° - parce que la voûte est large et que les rotules eussent coûté cher.

f_1 — Élevation — 2mm (S1, S2, Φ1)

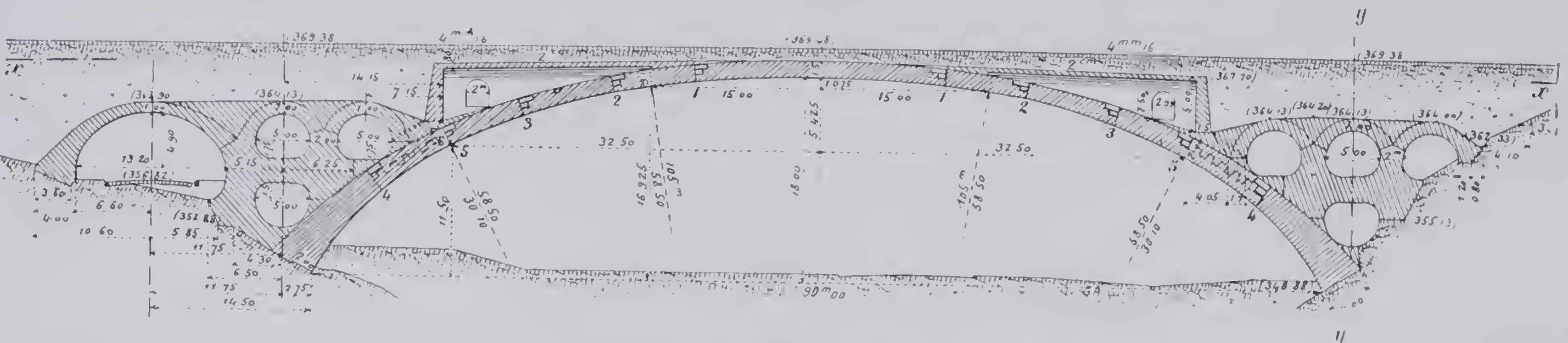


f_2 — Coupe sur *xx* de f_3 — 2mm (S1)



f_3 — Coupe en long — 1mm5 (S1)

f_4 — Coupe en travers sur *yy* de f_3 — 3mm (S1)



3. Tympans (S_1) (f_2, f_3, f_4). — Sur les reins, l'intervalle entre les tympans est occupé par 7 murs longitudinaux supportant de petites voûtes recouvertes de fine cendre de coke. Les deux murs extrêmes, épais, à deux fruits, aveuglent les voûtes transversales d'évidement qui soutiennent le couronnement (f_1, f_2).

Le cerveau et les retombées sont recouverts de plaques d'asphalte : au-dessus, on a rempli en terre et sable.

On a ménagé dans les tympans, à 32^m50 de part et d'autre de la clef, des joints de dilatation, remplis d'une matière plastique (S_1).

4. Couronnement. Chaussée. — Le garde-corps est en encorbellement sur dalles et consoles de granit ancrées dans les tympans : il est plein aux culées et sur les reins, – à jour au milieu.

La chaussée porte deux voies de 1^m pour tramway (S_1).

5. Matériaux.

A. Pierres. — La grande voûte est en moellons de « *phylitte* » de 10 à 12^{cm} d'épaisseur, schiste résistant à 1580^k en moyenne (S_2), des carrières de Teuma et Tirpersdorf près Plauen, bien lavés à l'eau sous pression (S_1).

Avec ces petits voussoirs, on a employé 42 à 45 % de mortier (S_2). Cette grande voûte est donc, pour près de moitié, en mortier.

Au lieu de montrer sur les têtes les petits moellons, on a simulé des pierres de taille de granit de gros appareil, par un crépi de 1 de ciment et 5 de sable blanc de la vallée de Lauten (S_4).

On a barbouillé la douelle d'un crépi uniforme, sans lits ni joints. On dirait d'un pont en béton (S_4).

Très évidemment, on s'est peu préoccupé de l'aspect.

B. Mortier. — Le ciment (Portland) devait avoir séjourné 14 jours au moins dans le hangar.

Le mortier à 1/3 de sable normal résistait (moyenne de 6 à 10 épreuves) : à 45 jours, à 407^k à la compression, à 40^k à la traction (S_1) ; après 24 semaines d'exposition à l'air, à 600^k à la compression (S_2).

6. Calculs. — On admis deux hypothèses de surcharge (S_1) :

1° – une file de véhicules à essieux de 1^m25, chargés de 15 tonnes, espacés de 3^m50, avec une foule de 560^k par mètre carré ;

2° – 3 rouleaux à vapeur pesant chacun 23 tonnes, avec une foule de 575^k par mètre carré.

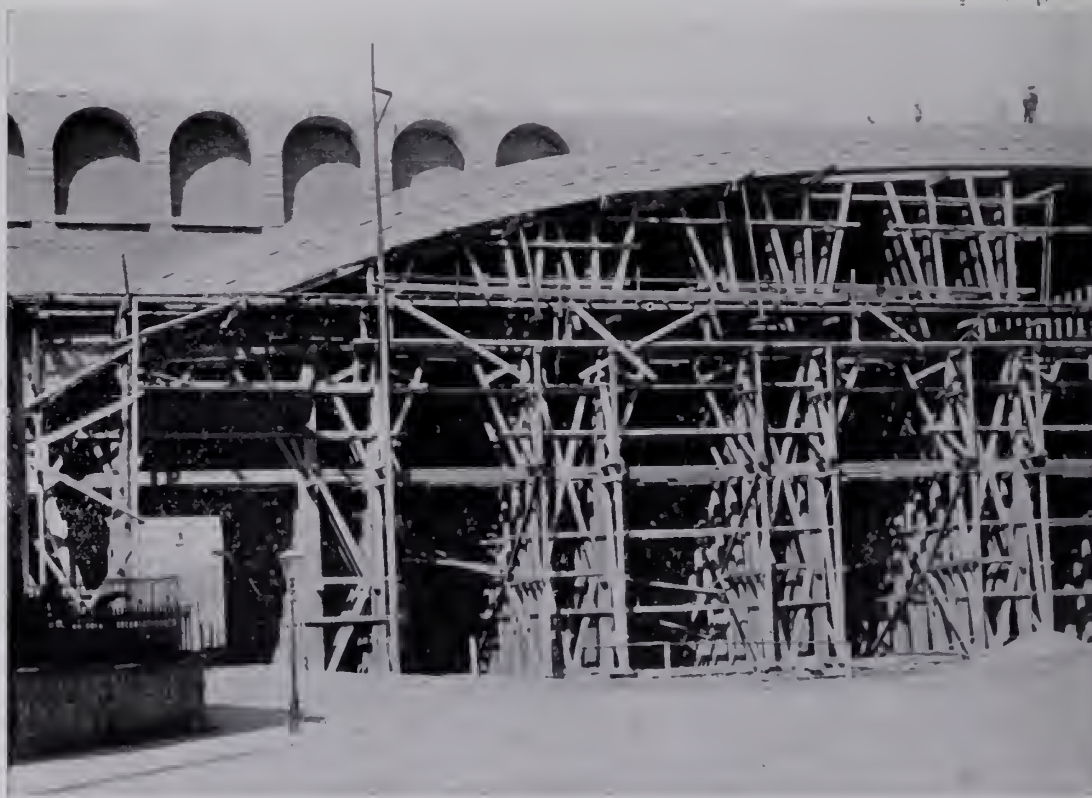
Les efforts ont été calculés par deux méthodes.

Des courbes de pression avec points de passage arbitrairement choisis [1], indiquent dans la voûte surchargée un effort maximum de 53^k4, à 32^m50 de la clef, aux « joints de rupture » (S_2).

En appliquant la théorie de l'élasticité, avec l'aide des lignes d'influence, à une voûte élastique de 65^m d'ouverture, 6^m50 de flèche, portée par deux culées en surplomb de 12^m50, reposant sur un rocher invariable, M. le Professeur Lucas, de l'École Polytechnique de Dresde, a trouvé, pour la position la plus défavorable de la surcharge et en tenant compte de la température (S_1), une pression maxima de 69^k et une tension maxima de 4^k5 (S_2).

7. Cintre. — (Φ_2, f_5, f_6).

Φ_2 (S_1)



Il a 3 étages de pièces équarries : l'étage supérieur a 21 fermes reposant sur une ligne de coins C (f_5, f_6) qui servent à régler la hauteur des fermes, puis à décintrer (S_1).

Les deux autres étages n'ont que 11 fermes (S_1).

Les palées de l'étage inférieur reposent sur des plate-formes en maçonnerie de ciment de 20^m de longueur.

1. « Stützlinien ».

Cintre

f_5 — Élévation — 3^{mm} (S_2)

f_6 — Coupe en travers — 3^{mm} (S_1)

En 3 mois, on a approvisionné les bois, construit le cintre (avec 40 charpentiers) ; on l'a monté en 14 semaines (S_2).

8. Fondations. — On a bourré les fentes du rocher de maçonnerie à ciment (béton et moellons).

Une galerie de mine abandonnée, qui passait en biais sous la culée Sud, a été remplie de maçonnerie, puis recouverte d'une dalle de béton de ciment, armé de 8 fers en **I** de $0^m 36$ de hauteur et 16^m de longueur (S_1).

9. Exécution de la grande voûte. — On l'a construite sur toute son épaisseur, — c'est-à-dire en un seul rouleau [2], — en 6 tronçons, séparés par des vides de 1 à 2^m de largeur, et soutenus par des étais en bois, serrés par des coins (S_2).

Les moellons étaient répartis d'avance sur le cintre, avec un poids supplémentaire représentant le mortier (S_2).

On avait préalablement disposé sur le cintre, dans le plan des têtes, des moules à surface intérieure grossièrement dressée avec des joints en saillie pour donner l'aspect de la pierre de taille. On jetait le crépi, à l'état de terre humide, contre ce moule, sur 7^{cm} d'épaisseur, puis on construisait la voûte, en reliant les moellons de tête au crépi avec du mortier de ciment (S_1).

Le crépi faisait ainsi corps avec la maçonnerie de la voûte, et ne s'est pas émietté, comme cela se produit souvent, quand on le pose sur la maçonnerie déjà faite (S_1).

On clava dans l'ordre des chiffres 1 à 5 (f_3), c'est-à-dire, d'abord à partir de la clef, puis à partir des naissances pour finir au joint de rupture (S_2).

10. Décintrement [11 juillet (S_3) – 7 septembre 1904]. — Sous le cintre, entre ses semelles inférieures et les socles maçonnés, avaient été disposés des billots de hêtre rouge de 7^{cm} d'épaisseur, *b* (f_5, f_6) (S_2).

Pour décintrer, on les attaqua à la scie ; leur noyau s'écrasant peu à peu, on put desserrer facilement les coins entre les deux étages supérieurs (S_2, S_3).

La voûte s'affaissa de 82^{mm} à la clef (S_1), sans se fissurer (S_3).

Les tympans s'ouvrirent (S_2), comme on l'avait prévu, à 32^m50 de part et d'autre de la clef, c'est-à-dire aux retombées du cerveau considéré comme une voûte élastique de 65^m sur culées en surplomb.

11. Durée de la construction. — On commença la préparation du terrain le 26 mars 1903 (S_2), les fondations le 1er août, la maçonnerie de la voûte le 21 août. On travaillait le soir à la lumière électrique. On fit le dernier clavage le 8 novembre 1903 (S_1).

On reprit au printemps 1904. On construisit les voûtes d'élégissement, les tympans. Les maçonneries étaient terminées fin septembre (S_2).

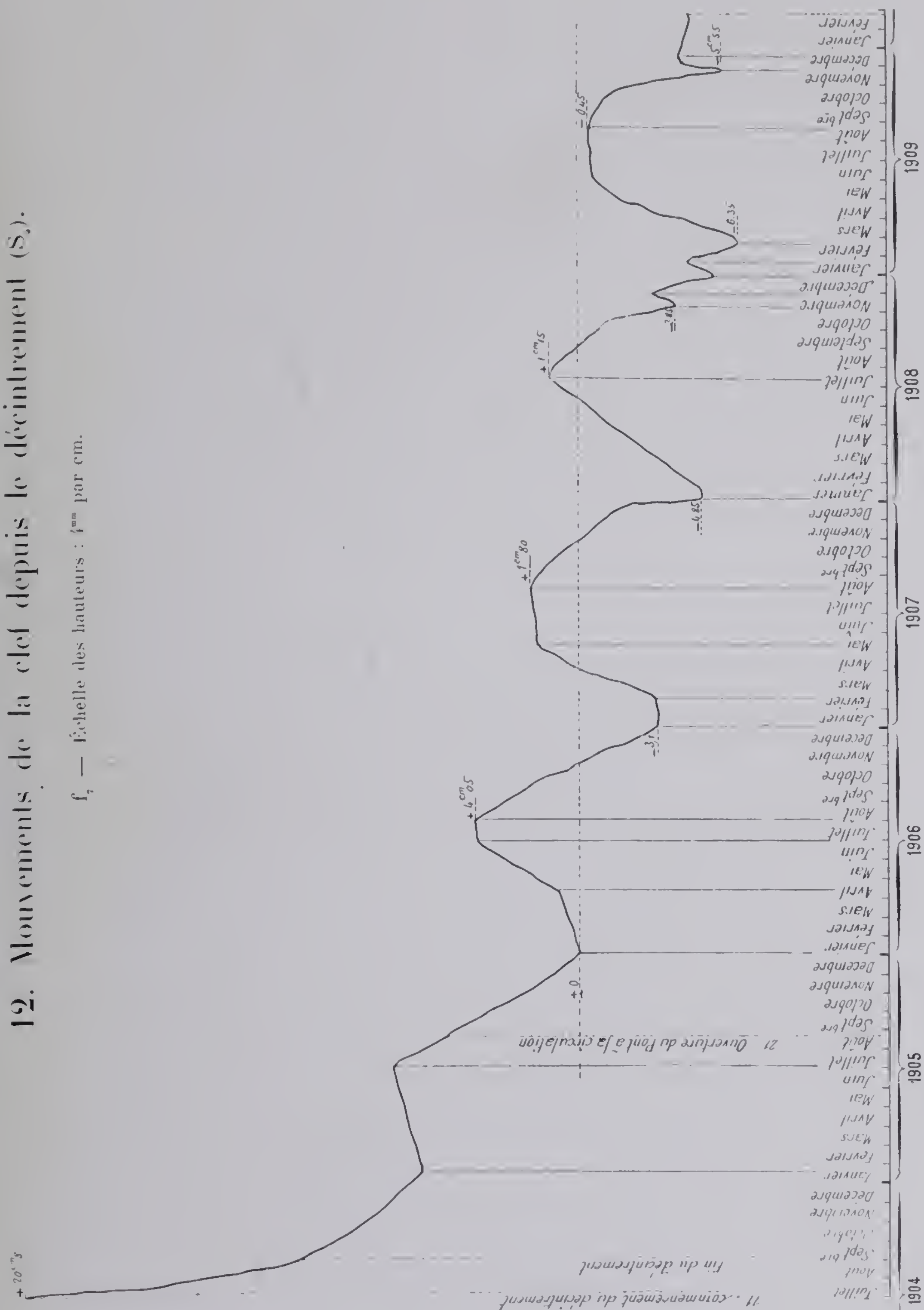
Le pont fut inauguré par le roi Frédéric-Auguste III, le 24 août 1905 [3].

2. — Les moellons de phyllite, bien lités, ont été exactement appareillés suivant le rayon (S_2).

3. — « *Im Beisein seiner Majestat Friedrich August III Konig von Sachsen wurde diese Brucke am* « *24 August 1905 feierlich dem Verkehr übergeben.* » (Inscription sur la culée rive droite amont).

12. Mouvements de la clef depuis le décintrement (S₁).

f₁ — Échelle des hauteurs : 1mm par cm.



13. Dépenses (S_1) (non compris les abords).

Fouilles	16.831f76
Maçonnerie et remplissage	465.575f86
Garde-corps en fer et appareils d'éclairage	32.185f19
Chaussée et trottoirs	60.157f50
Divers	39.991f47
Total	614.741f78

14. Personnel.

Projet et Exécution : MM. Liebold et Cie, de Langebrück, près de Dresde (Saxe).

Les travaux ont été surveillés par M. Fleck, Architecte de la ville de Plauen.

1. — Plaque culée rive droite amont : « *Entwurf und Ausführung Liebold u. Co Langebruck, in* « *Verein mit der Bauverwaltung Plauen. — Bauzeit 1903-1905.* »

SOURCES :

S_1. — Deutsche Bauzeitung, 1904 — n° 57, 16 juillet, p. 354 à 358 ; n° 58, 20 juillet, p. 361 et 362 : « *Die Syratalbrücke in Plauen, i. V* » von Stadtbaurat Fleck, Reg. Bmstr. a. D., in Plauen i. V.

S_2. — « Mitteilungen des Vereines der Ingenieure der k. k. österr. Staatsbahnen », 1er décembre 1904, p. 139 à 142, Pl. VIII : « *Die weitest gespannte Wölbbrücke der Welt* », von Ing. R. Jaussner, Bau-Oberkommissär der k. k. österr. Staatsbahnen in Görz.

S_3. — Renseignements qu'ont bien voulu me donner MM. Liebold.

S_4. — Ce que j'ai vu :

S'_4. — septembre 1906.

S''_4. — août 1908.

S_5 — Renseignements gracieusement communiqués par M. Fleck, — mars 1910.

PONT SUR LA SINGINE[1], PRÈS DE GUGGERSBACH[2] *(SUISSE, – Berne[3])*

1906 $\widehat{A}^1$ r^{le} ($\geqslant$ 40m) 11

Φ_1 (S''_4)



1. Matériaux. — Tout est en béton :

en béton non armé, la voûte ;

en béton armé, les murs transversaux sur la voûte, le hourdis sous chaussée et ses nervures (f_3, f_4).

Le parement du béton n'a pas été retouché.

2. Joints de dilatation. Chape. — La plate-forme est coupée par deux joints de dilatation *jj* (f_1, f_2, f_4), recouverts de feuilles de tôle.

Elle est, comme l'extrados de la voûte, revêtue d'une chape en ciment.

3. Efforts dans le béton armé, en $kg/\overline{0^m01}^2$.

Béton (à 300k de ciment par mc. de béton)	35k
Acier	1.000k (traction)

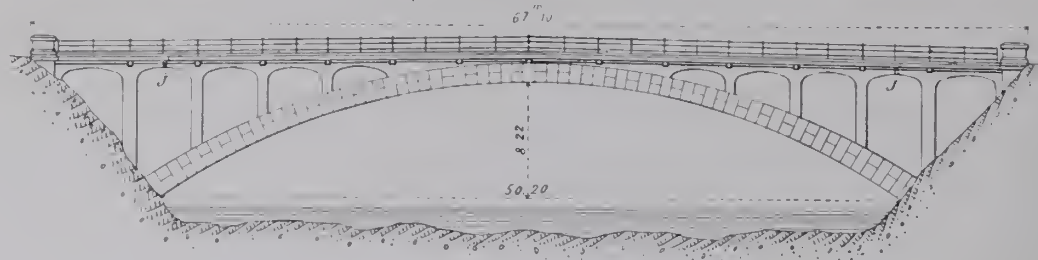
La plate-forme et les nervures ont été calculées comme des poutres continues.

1. — En allemand : « *Sense* ».

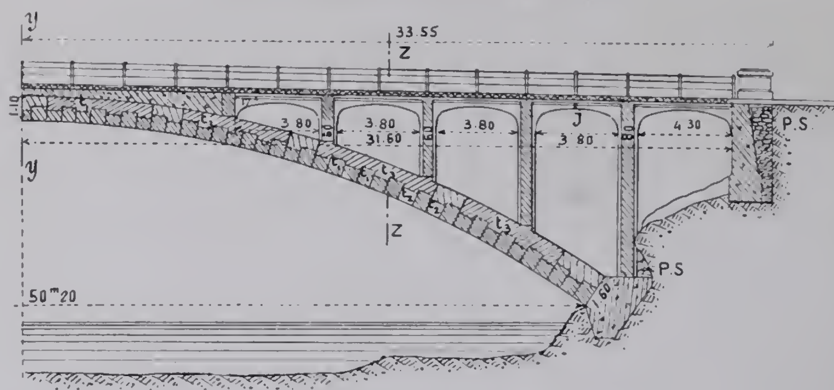
2. — Entre Guggisberg et Planfayon (en allemand « *Plaffeyen* »).

3. — Le pont relie le district bernois de Guggisberg au district fribourgeois de la Singine.

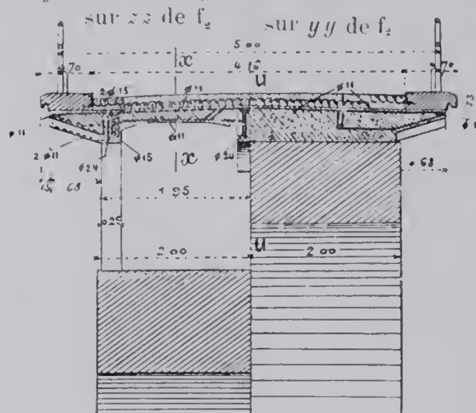
f₁ — Élévation — 2ᵐᵐ



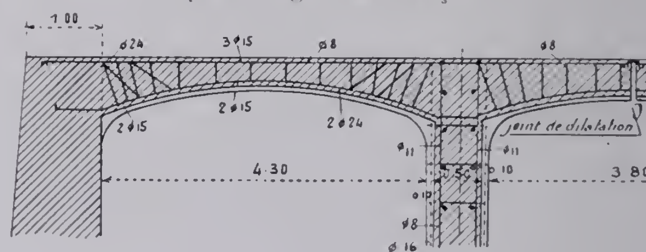
f₂ — Demi-coupe en long sur xx de f₃ — 3ᵐᵐ



f₃ — Demi-coupes en travers — 1ᶜᵐ
sur zz de f₂ sur yy de f₂

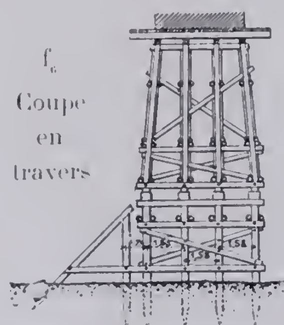


f₄ — Nervure du hourdis
Coupe en long sur uu de f₃ — 1ᶜᵐ

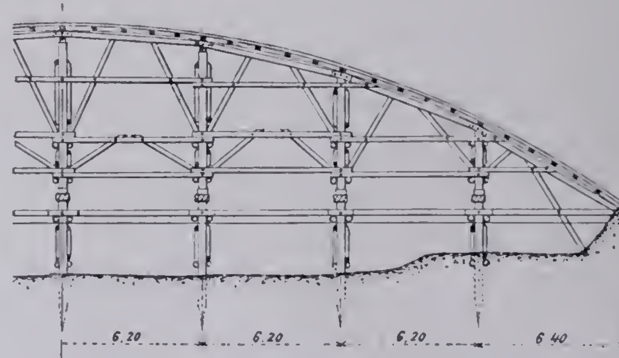


Cintre — 3ᵐᵐ

f₆
Coupe
en
travers



f₅
Élévation



4. Cintre (f_5, f_6). — Il était en bois en grume, sauf les vaux et les couchis. Des brise-lame protégeaient les palées contre les bois entraînés par les crues de la Singine, dangereuses en toute saison.

5. Exécution de la voûte.

A. 1er rouleau. — On pilonnait le béton sur toute la largeur de la voûte, par tranches isolées t_1 (f_2) (S''_4) ; puis on remplissait, mais sur une hauteur moindre, les intervalles t_2.

On clavait à la clef, aux retombées, et au droit des points fixes du cintre, dans l'ordre que paraissait imposer la déformation du cintre.

Le cerveau du cintre avait été peu chargé : il se releva pendant la construction. On l'abaissa en le chargeant de pierres (S_2).

B. 2e rouleau (S_1). — Le 1er rouleau achevé, on commença immédiatement le second, par paires symétriques de tranches t_3 de la largeur de la voûte (f_2), chaque tranche correspondant à plusieurs du premier rouleau.

6. Dates.

	1906
Commencement des travaux	28 mai
Commencement du bétonnage	13 août
Fin du premier rouleau	31 août
Fin du second rouleau	14 septembre
Achèvement de l'ouvrage	13 octobre
Décintrement	15 décembre

7. Personnel.

Projet : MM. Jäger et Cie, de Zurich.

Direction des travaux : M. G. d'Erlach, Ingénieur à Berne.

Entrepreneurs : MM. Gribi, Hassler et Cie, de Berthoud.[1]

1. — En allemand : « *Burgdorf.* »

SOURCES :

S_1. — Schweizerische Bauzeitung, 29 février 1908, p. 107 à 110 : « *Brücke über die Sense* « *bei Guggersbach* », M. J. Bolliger, Ingénieur à Zurich.

S_2. — Bulletin technique de la Suisse romande, 25 mai 1908 : « *Pont sur la Singine à* « *Guggersbach* », M. Am. Gremaud, Ingénieur cantonal à Fribourg.

S_3. — Renseignements que l'Entreprise a bien voulu donner pour moi à M. d'Erlach.

S_4. — Renseignements (S'_4) et photographie (S''_4) gracieusement communiqués par M. d'Erlach.

On a pris dans S_1 les dessins, et tout ce qui n'est pas spécifié comme d'une autre source.

PONT SUR LA VALSERINE, AU MOULIN DES PIERRES, PRÈS DE MONTANGES[1] (AIN)

Chemin de fer électrique d'intérêt local à voie de 1m de Bellegarde à Chézery et Chemin de Grande Communication n° 11

1908-1910 $\widehat{A}$ r^{le} (à 40m) 12

Φ_1[2]



1. Dispositions d'ensemble. — Là, dans cette brèche entre ces hautes falaises, une grande voûte est bien à sa place.

Les naissances avaient été prévues au même niveau. On a abaissé celle de rive droite au-dessous d'un banc de calcaire gélif, et élevé celle de rive gauche pour mieux placer les boîtes à sable. L'ouverture a été ainsi portée de 80m à 80m29 (S_2).

Les piles des voûtes d'évidement reposent sur des gradins découpés dans la voûte sur 18cm de profondeur au plus (S_1).

2. Chape. — Elle a 12cm. Elle est faite d'un mélange de 1 partie de bitume liquide et 3 parties de mastic d'asphalte (S).

1. — A 8k en amont de Bellegarde (Ain).

2. — Cliché de M. Ed. Boulland, Photographe à Bellegarde.

f[1] — Élévation aval — 2mm (S'[1] et S[2])

109 m 49

60 m 85

48 64

5.30 5.30 5.30 5.30 5.30

1.06 1.06

20 00

Niveau prévu des Naissances (472 87)

40 83

39 m 46

(471 68) (473 53)

6 83

Ouverture totale de l'Arche = 80 m 29

Crue du 21 Janvier 1910 (437 70)

HE ordinaires (435 50)

La Valserine (433 87) BE

f_4 — Demi-coupe en long — 2mm5 (S'_1 et S_4)

f_5 — Coupe en travers à la clef — 1cm (S'_1)

3. Cintre. — *A. Dispositions d'ensemble.* — Il portait sur 3 hautes piles en bois, reposant sur 3 socles en maçonnerie fondés : celui de rive gauche, sur rochers éboulés ; les deux autres, sur gravier, sable, et gros galets : celui du milieu, sur pieux à têtes reliées par un grillage, noyées sur 0m70 à 1m20 dans du béton immergé ; celui de rive droite, sur 0m70 de béton, dans une enceinte de pieux (S_4).

Les poteaux des piles étaient assemblés, par longueurs de 9m, comme l'indique f_6. Les 4 poteaux extérieurs étaient renforcés par des cornières *c* (f_7).

f_6 — Assemblage de 2 pièces d'un montant — 3cm

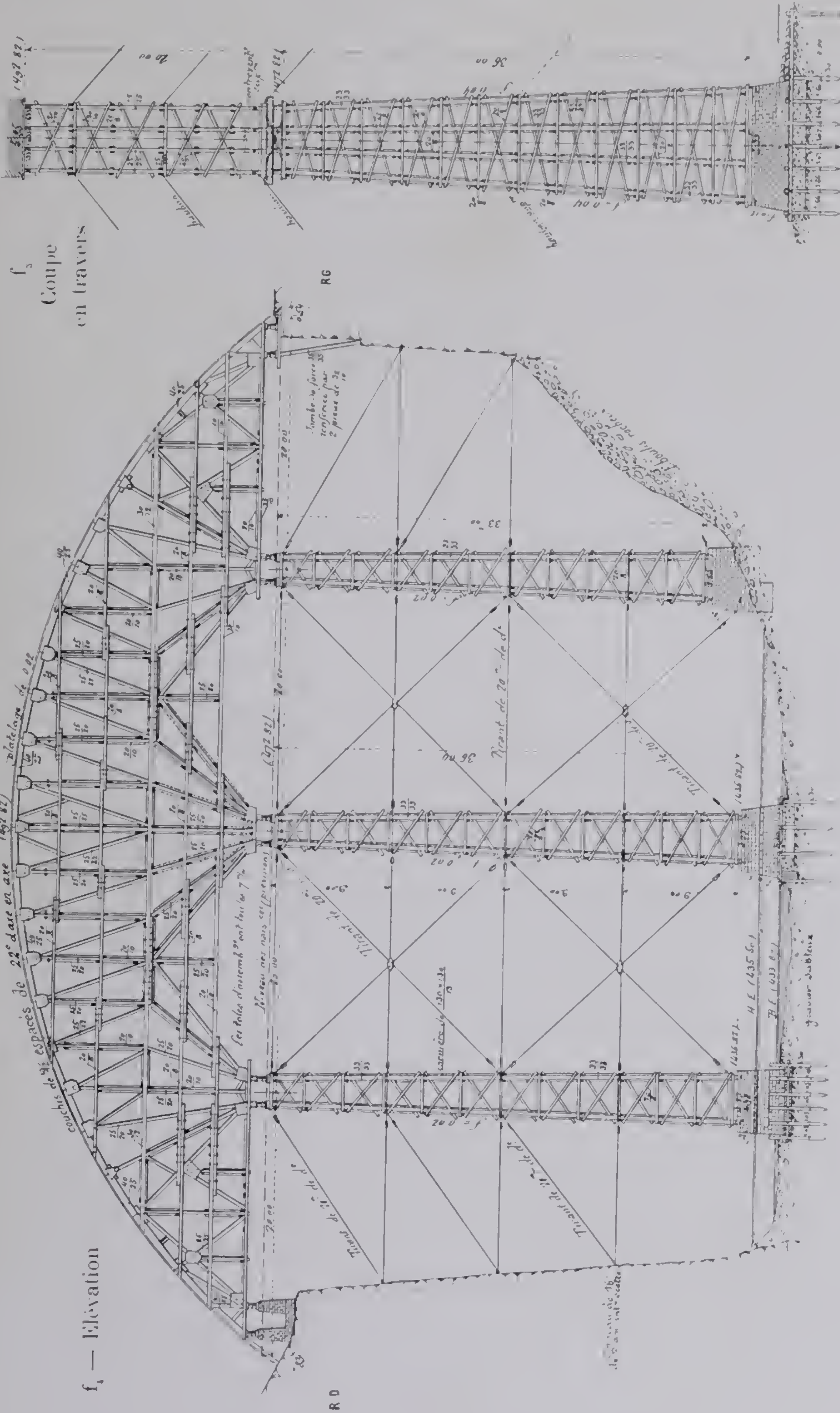
Contreventement horizontal d'une pile

f_7 — Ensemble — 7mm5

f_8 — Détail — 3cm

Le cintre était tenu par 8 haubans, munis de tendeurs, amarrés au rocher (f_4).

Dans les assemblages, les abouts des pièces étaient protégés par une tôle de 1mm (S_4).


Cintre — 2mm (S.)
f1 — Élévation
f2 Coupe en travers
RD
RG

B. Calcul — Les pièces ont été calculées[3] pour supporter le poids du premier rouleau.

Voici les efforts maxima en kg/$\overline{0^m01}^2$ (S_2) :

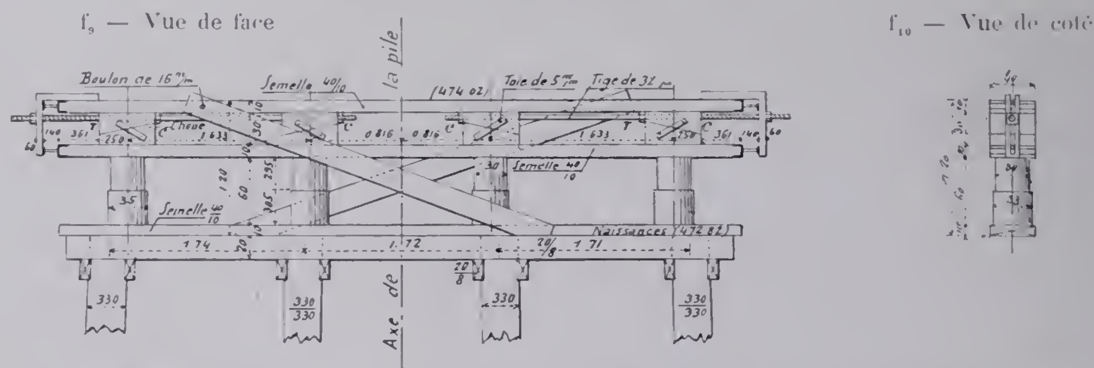
		Pour la charge du premier rouleau	Pour la charge de la voûte entière
Couchis		77^k	141^k
Vaux		66	138
Pièces de l'étage	supérieur	20	38
	inférieur	35	64
Piles (avec vent horizontal de 250^k par m.q. de surface verticale pressée)	poteaux, sans tenir compte des ferrures (S_2)	66	84
	moises	32	37
	croisillons	37	42

C. Appareils de décintrement. — *Boîtes à sable et coins.* — Le sable, grillé, était garanti de l'humidité par une corde goudronnée enroulée autour du piston, et par un chapeau en tôle (S_6).

Pour augmenter au-delà de 20^cm la course des boîtes à sable au décintrement, on avait disposé, au-dessus, les coins C, commandés par les tiges filetées T (f_9, f_{10}) : ils n'ont pas servi (S_2).

Appareil de décintrement — 1^cm5

f_9 — Vue de face f_{10} — Vue de coté



D. Mise en place. — Le cintre a été mis en place en 110 jours, par 5 charpentiers, 5 manœuvres, 2 mécaniciens, 1 chef de chantier (S_2).

Un transporteur électrique à câble a monté le cintre, et plus tard transporté les matériaux[4].

4. Mouvements du cintre avant la construction de la voûte. —

En février 1909, avant qu'il eut été chargé des matériaux de la voûte, un ouragan le fit tourner autour de son appui rive gauche, sur les semelles des boîtes à sable, de 32^cm à l'appui rive droite, 15^cm à la pile rive droite, 5^cm à la pile centrale.

On le remit en place en tendant les haubans amont (S_2).

3. — avec les formules données aux Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1886, p. 503 et suivantes : « *Construction des ponts du Castelet, de Lavaur et Antoinette* », M. Séjourné (S_6).

4. — Il a fait alors au maximum, en 11 heures, 145 transports de 800^k.

5, Exécution de la grande voûte. — *A. - Division en rouleaux.* Elle a été construite en 3 rouleaux :

le premier comprenait toute la douelle ; le troisième tout l'extrados ; le second, seulement la deuxième rangée de moellons aux reins.

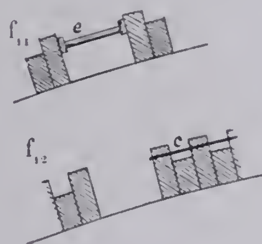
Φ_2 — Construction du 1er rouleau (S₄)



Dans tous les joints, arrosés (S_9), le mortier a été fiché, puis maté (S_3).

B. - 1er rouleau. — Les joints secs des retombées étaient maintenus à l'intrados par des liteaux en chêne de 10mm × 60mm ; à l'extrados, par 14 cales en plomb de 14mm d'épaisseur, longues de 35cm, larges de 16cm ; on bourrait l'intervalle entre ces cales avec de l'étoupe goudronnée (S_3).

Les libages de douelle se découpent, non seulement par assise, mais aussi dans la même assise (Φ_2). Il est alors difficile de bien poser, et surtout de bien maçonner le queutage (S_4).



Etais *e* et Câbles *c* soutenant les tronçons des reins pendant le clavage.

C. - Clavages (S_3). — On clava, des reins vers la clef, et on termina aux retombées.

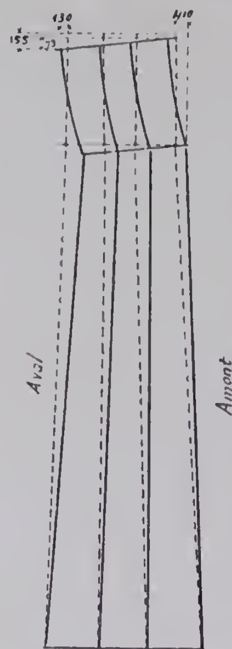
Pendant le clavage aux reins, on soutenait les tronçons supérieurs par des étais *e* (f_{11}), ou on les retenait par des câbles *c* (f_{12}).

Le mortier était fiché, puis énergiquement maté à la spatule, à partir des têtes.

6. Mouvements du cintre pendant la construction de la voûte.

A. 1er rouleau (23 juin – 25 juillet 1909) (S_1). — Pendant le chargement et la construction du premier rouleau, le haut des piles du cintre s'inclina vers l'amont, le sommet du cintre vers l'aval (f_{12}).

f_{11} — Coupe en travers du cintre, le 27 juillet 1909



La voûte suivit. Le 23 juillet, sa tête aval avait une flèche en plan de 70mm (S''_1).

On observa ce jour-là 4 très minces fissures aux reins, deux de chaque côté.

La plus importante « *avait l'épaisseur d'une fine* « *aiguille* » (S_1). On refouilla le joint, et on le remplit d'un coulis de ciment.

Les autres, à peine perceptibles, disparurent quelques jours après le clavage.

On ajouta au cintre des contreventements et des haubans, indiqués en pointillé sur f_1 et f_2.

On travailla jour et nuit pour claver promptement le premier rouleau.

Dès qu'il fut clavé, le mouvement en plan s'arrêta : la flèche de la tête aval était alors de 130mm (f_{12}).

B. 2e rouleau (25 juillet – 11 août 1909). — Pendant deux jours, les tassements continuèrent, un peu plus forts à l'aval qu'à l'amont.

Voici les tassements observés pendant la construction (S_1) :

Dates (1909)			Charge en tonnes	Tassement en *mm* de la clef à l'amont	Tassement en *mm* de la clef à l'aval	Différence de tassement aval — amont
Mai	22	On commence à charger	0	0	0	0
	28		13 t	6mm	4mm	— 2mm
Juin	2	On charge le cerveau du cintre.	40	9	13	4
	7		48	9	13	4
	15		170	17	21	4
	21		180	22	28	6
	23	On commence les maçonneries	230	23	30	7
Juillet	15	1er rouleau	705	36	45	9
	20		810	42	63	21
	24			69	108	39
	25	matin, avant clavage	1296	70	132	62
		soir, après clavage		76	145	69
	27	2e rouleau		82	155	73
Août	21			82	155	73

7. Décintrement. — On enleva le sable par hauteurs de 12mm. Le cintre se détacha vers 40mm.

On constata, avec l'appareil amplificateur Rabut, un tassement de $0^{mm}2$ à $0^{mm}4$ à la clef.[5]

8. Dates (S_3).

Fouilles		mai - juin 1908
Montage du cintre		1er sept. 1908 - 16 janvier 1909
Grande voûte	Construction	18 mai - 31 août 1909
	Décintrement	6 novembre 1909
	Rejointoiement	16 mai — 15 juillet 1910
Achèvement des travaux		fin septembre 1910

Le 21 janvier 1910, une crue extraordinaire, charriant des arbres, emporta le cintre. On remboursa 21.000^f à l'entreprise.

9. Quantités et Dépenses (S_3).

	Quantités	Prix de revient des fournitures à l'unité	des fournitures par nature de matériaux	des fournitures par parties d'ouvrage	de la main-d'œuvre par nature de matériaux	de la main-d'œuvre par parties d'ouvrage	de l'ensemble
Travaux préparatoires (installation, outillage)				39.815f00		9.923f23	49.738f23
Grand et petits cintres — Fouilles, pilotis, maçonnerie			5.758f53		8.240f71		
Grand et petits cintres — Bois — Cintres	568mc42	60f	37.605f20		23.560f60		
Grand et petits cintres — Bois — Passerelle de service	70mc	50f					
Grand et petits cintres — Fers	42.595k	0f30 à 1f	23.375f87				
				66.739f60		31.801f31	98.540f91 [6]
Grande voûte — Pierre — Bandeaux	232mc830	68f	15.832f44				
Grande voûte — Pierre — Douelle et queutage	761mc175	55f	40.955f31				
Grande voûte — Pierre — Transport			8.302f12				
Grande voûte — Sable (trié et lavé)	130mc	1f	130f				
Grande voûte — Ciment (12 % de mortier)	77T7	52f	4.040f40				
Grande voûte — Divers			3.153f70				
				72.413f97		26.499f44	98.913f41
Maçonnerie et remplissage au-dessus de la grande voûte				43.366f74		19.842f83	63.209f57
Rejointoiements				1.382f		4.317f16	5.699f46
Garde-corps en fonte — Panneaux	26.500kg	0f35	9.275f				
Garde-corps en fonte — Accessoires			440f				
				9.715f		2.611f08	12.326f08
Murs de soutènement et abords				12.647f60		10.312f86	22.960f46
Travaux divers						3.562f15	3.562f15
Totaux				246.079f91		108.870f06	354.949f97 [7]

5. — Annales des Ponts et Chaussées, 1910-III, p. 191 à 193 : « *Notice sur les Travaux de construction* « *du pont de Montanges* », par M. F. Lefort, Ingénieur des Ponts et Chaussées.

6. — Les 11 cintres des 11 voûtes d'évidement, — faites ensemble pour gagner du temps, — ont été payés au prix du cintre de la grande voûte : 115^f le mètre cube, en tout 5106^f (S_3).

7. — Non compris 21.000^f remboursés à l'entreprise pour perte du cintre.

10. Personnel (S_2).

Projet :

M. Picard, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées ;

M. Dor, Agent-Voyer en chef de l'Ain ;

M. Clermidy, Agent-Voyer principal.

Exécution :

M. Picard ;

M. Dor ;

M. Vallier, Ingénieur des Ponts et Chaussées.

Entrepreneur : M. Petit, à Bellegarde.

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution (S'_1) et renseignements (S''_1) qu'a bien voulu me communiquer M. Vallier.

S_2. — Renseignements gracieusement donnés par M. Picard.

S_3. — L'Ingénieur-Constructeur, - 1910, - 15 mars, p. 129 à 143 ; — 15 avril, p. 177 à 207, Pl. 1 : « *Pont du Moulin des Pierres, sur la Valserine* ». M. A. Reynaud, Chef de service à la construction du chemin de fer électrique de Bellegarde à Chézery.

S_4. — Ce que j'ai vu — juillet 1909.

S_5. — Annales des Ponts et Chaussées, 1911 - IV, p. 101 à 203, Pl. 11 à 14 : « *Notice sur* « *la construction du Pont de Montanges* ». M. Picard, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

Cette notice était achevée avec les sources S_1 à S_4, quand a paru S_5, qui a permis de la compléter très utilement.

S_6. — L'Ingénieur-Constructeur, 15 octobre 1912, p. 485 à 516. — « *Pont du Moulin des* « *Pierres, sur la Valserine* ». M. A. Reynaud *(Suite et fin de S_3)*.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ [1]

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS CONDUITE D'EAU

(AQUEDUCS)

Série $\overset{\frown}{\mathbf{A}}{}^{1}\mathrm{aq}_{(-40^{m})}$ [2]

Voir Préliminaires, Tome III, p. 3 et 4

1. — pour la définition des arcs « assez surbaissés ».

2. — pour le sens de ce symbole.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CONDUITE D'EAU

PONT Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE *Longueur de l'ouvrage* Déclivité Hauteur maxima de l'ouvrage au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeur *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans	GRANDE VOÛTE — INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Retombées*	ÉPAISSEURS — TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg / 0m01² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMEN[T] DES TYMPAN[S] 2° *DÉCORATI[ON] DES TÊTE[S]*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Cabin-John** *États-Unis* 1857-1864 $\widehat{\mathbf{A}}^1$ aq (40m) [1]	*137m* » 27m	*6m 10* Pas de fruit	Arc de cercle **67m,10** *47m 47* $\frac{1}{3,84} = 0,260$ *40m 878*	**1m,27** sous la conduite d'eau **2m,90** en dehors *6m,10*	**1m,27** *1m 88*	1er rouleau : *(voir col. 15)* Granit Lits de 3mm 2e rouleau : Grès		1° 4 voûte[s] transver[sales] cachée[s] en plein ci[ntre] 2° »

(1) Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, page II, n°

(AQUEDUCS)

SÉRIE $\widehat{A}^1$ aq ($\frown$ 40^m)

TABLEAU SYNOPTIQUE

EXÉCUTION								CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q
FONDATIONS	GRANDE VOÛTE							DÉPENSE D
	CINTRE							
	FERMES		Cube de bois Poids de fer Dépenses					
Nature du sol Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0^m01^2 *Procédé*	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t_v après t''_v	Totaux et par unité de surface utile S_p [3] de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Rocher	Fixe	4			2 rouleaux indépendants			
»	*Sapin*	»						
»	»	»						
On régularisa le rocher avec du béton								

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A* 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CONDUITE D'EAU (AQUEDUCS)

SÉRIE $\widehat{A}^1 aq_{(>40^m)}$

MONOGRAPHIES

PONT DE CABIN-JOHN, SUR LE CABIN-JOHN CREEK, PRÈS DE WASHINGTON[1] *(ÉTATS-UNIS)*

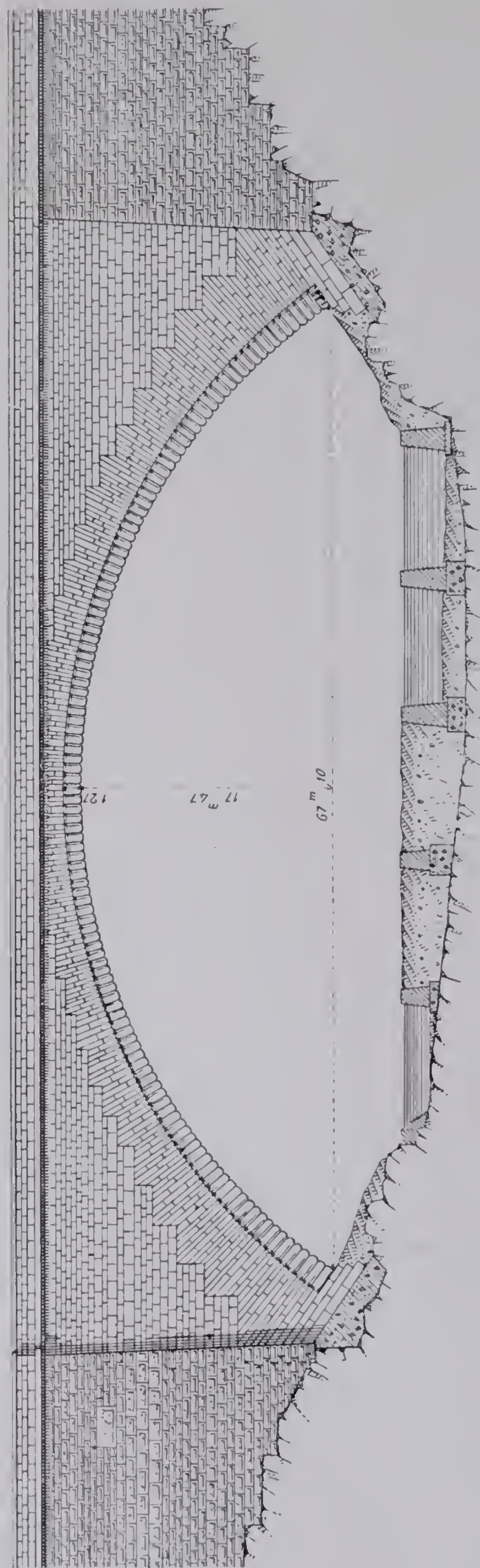
1857–1864 $\widehat{A}^1 aq_{(>40^m)}1$

Φ_1 (S_2)

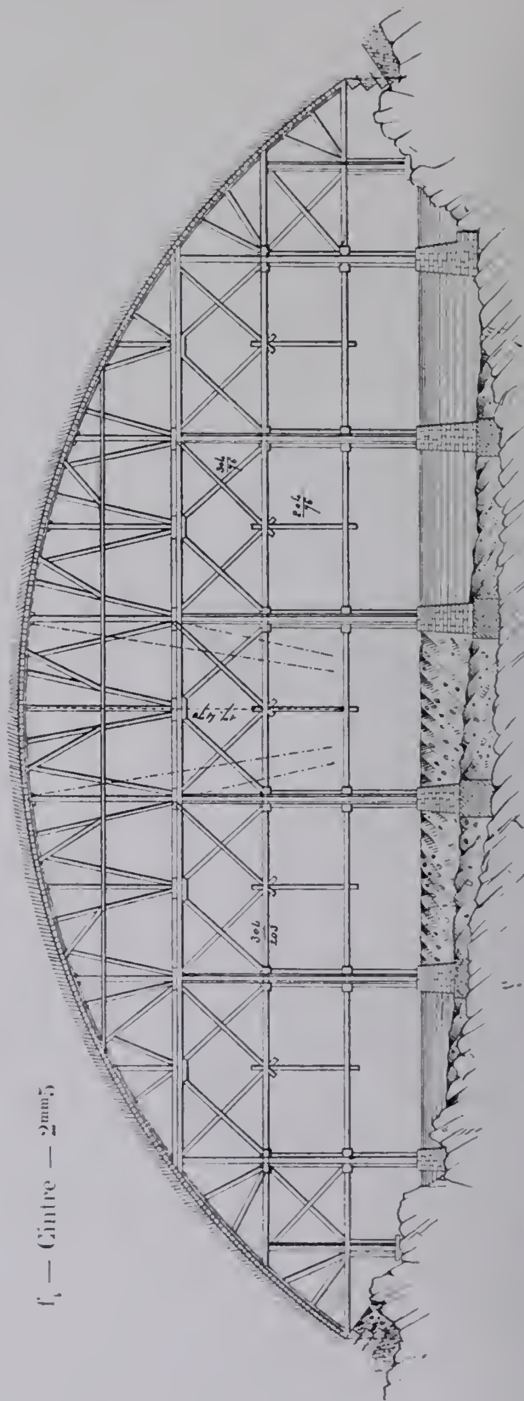


I. Conduite d'eau sur l'ouvrage. — Le pont porte une conduite circulaire (f_1), dans laquelle passe l'eau d'alimentation de Washington, prise au Potomac.

1. — A 10^{km} environ.



f₁ — Élévation — 2mm

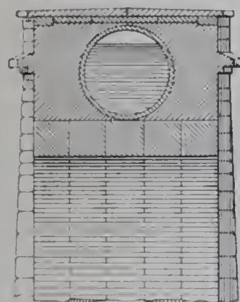


f₁ — Cintre — 2mm5

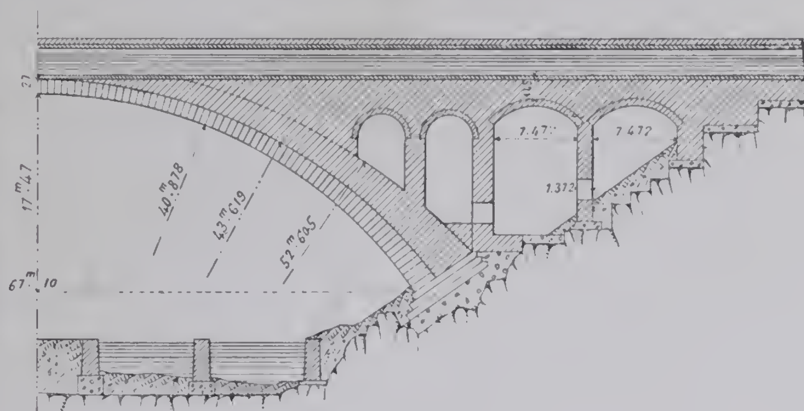
2. Voûte en deux rouleaux indépendants.

Le deuxième rouleau est échancré au cerveau par la conduite d'eau, laquelle, à la clef, s'appuie sur le premier.

f₃ — Coupe en travers à la clef — 1mm



f₂ — Coupe en long — 1mm5



3. Fondations. — On a régularisé la surface du rocher avec du béton, sur lequel on a placé un large sommier fait de 3 assises de granit.

4. Décintrement. — La voûte, achevée en hiver, se détacha d'elle-même du cintre, l'été suivant.[2]

5. Ingénieur. — Général Meigs.[3]

2. — Zentralblatt der Bauverwaltung, 5, 8, 19 septembre 1906, p. 455 à 458, 462 à 465, 483 à 486 : « *Fortschritte im Bau weitgesprengter flacher massiver Brücken, vom Landesbaurat Leibbrand in* « *Sigmaringen* ».

3. — Renseignement gracieusement communiqué par M. Malverd A. Howe, Directeur du « Rose Polytechnic Institute » à Terre Haute (Indiana).

SOURCES :

S₁. — Collection des dessins distribués aux Élèves de l'École des Ponts et Chaussées, Série 3, section A, Pl. 9 et 10 : « *Pont de Cabin-John* ». — Légendes explicatives des Planches, Tome II, p. 27 et 28.

S₂. — Ce que j'ai vu — mai 1905.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ [1]

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

Série $\widehat{A}^{1} F^{r}$ ($\geqslant 40^{m}$) [2]

Voir Préliminaires, Tome III, p. 3 et 4

1. — pour la définition des arcs « assez surbaissés »,

2 — pour le sens de ce symbole.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER

PONT Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE: *Longueur* entre abouts des parapets Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	ENSEMBLE: Largeurs entre parapets / *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	GRANDE VOÛTE: INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS: CORPS Clef *Retombées*	ÉPAISSEURS: TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg 0m01² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENT DES TYMPANS 2° *DÉCORATIO[N] DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Maretta** A¹ Fʳ (40m) 1 de **Prarolo** A¹ Fʳ (40m) 2 *Italie* 1851-1852	*77m* 8mm 28m	8m00 » Fruit $\frac{1}{20}$ 1m20	Arc de cercle aux têtes : **42m,92** sur l'axe : **40m,00** *10m 00* $\frac{1}{4}$ = 0,25 *25m*	1m,80 *9m 10*	1m,80 »	Briques s'écrasant à 54k74 (paraissant bien conservées) Dimensions : Longueur 26cm Largeur 13cm Épaisseur : 6c5, 6c7, 7c Briques spéciales en douelle Lits de mortier de 6mm au plus	Pression maxima à la clef : 12k51 *Méry* 9000k par m. c.	1° Pas d'évidemen[t] 2° »
d' **Isola del Cantone** (Pont en amont et Pont en aval) *Italie* 1852 A¹ Fʳ (40m) 3 et 4			**40m,00** » »			Briques		
de **Calcio** *Italie* 1877-1878 A¹ Fʳ (40m) 5	*121m 77* 6mm 15m75 fond du lit	8m00 *7m 50* Pas de fruit 0m60	Arc de cercle **42m,00** *11m 90* $\frac{1}{3,529}$ = 0,283 *24m 479*	1m,40 *2m 38* 14 ressauts de 14cm à l'extrados	1m,00 *1m 60*	Briques rouges de Crémone s'écrasant à 335k Dimensions : 28c × 14c × 6c5 *Chaux hydraulique de Palazzolo — 450k*	Pression maxima : Clef : 12k Retombées : 23k » 8000k par m. c.	1° Pas d'évidem[ent] 2° *Bandeaux 8 assises e[n] saillie, puis en retrait[e] Cadres da[ns] les tympa[ns] Angles des pilastr[es] à gros bossa[ge]*
du **Gour-Noir** *France* 1888-1889 A¹ Fʳ (40m) 6	*108m 16* 9mm RD RG 20m20	8m00 *8m 60* Fruit $\frac{1}{20}$ 1m06	Arc de cercle au niveau des fondations : **62m,00** aux retombées : **60m,00** *16m 10* $\frac{1}{3,726}$ = 0,268 *36m*	1m,70 *4m 20*	1m,70 *3m 70 à 50c*	Bandeaux et Douelle : PT [1] Bossages de 25 à 40c Queutage : MEV [1] Granit de Cabirol L'archivolte est en granit de Lonzac *Au-dessus de 18° 46' : Ciment artificiel Vicat n° 1 — 650k* *Au-dessous : Ciment — 800k*	A la clef : Pression : max. 33k2 moy. 16k6 *Méry* »	1° 6 voûtes transversal[es] vues, en plein cint[re] de 4m30, sur piles de 0m95 2° *Archivolt[e]*

1 — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, page II, n° 6.

VOIE NORMALE SÉRIE $\widehat{A}^1$ Fr (> 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE

FONDATIONS ...ature du sol Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol kg 0^m01^2 *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité de surface utile S_p [3], de volume « utile » W [5]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Maretta *Roc vif* - 3m Prarolo RD : *Roc* RG : *Argile compressible* *Grillage en chêne* *à grand empâtement*	*Le même cintre a servi pour les 2 ponts.* Retroussé sur 40m Type Pont de Neuilly *Chêne (Moises horizontales en mélèze)* »	7 *4 de rive* 10c *3 interm.* 30c 1m50 *270mm*	Chêne 411mc7 Mélèze 36mc5 Bois 448mc2 Fers 720k Dép. 26400f (pour chaque pont)	 1mc2 1k9 71f		Maretta » » 14 février Prarolo Voûte nue » » A l'un des ponts : » *30 jours* » A l'autre : » *60 jours* »	 t_c 180mm t'_v 15mm » t' 80mm » t'_v 35mm » t'_v = 50mm	Maretta Q = 17078mc Q : S_p = 27mc72 Q : W = 1m 10 D = 450 502f D : S_p = 731f3 D : W = 27f2 D : Q = 26f4 Prarolo — un peu moins cher
Gravier calcaire - 4m20 sous les eaux moyennes *Béton dans une enceinte de pieux jointifs et palplanches à la partie supérieure*	Fixe » Boîtes à sable	7 *30cm* » *150mm*	448mc 5675k 33958f	1mc08 14k6 87f4		» *32 jours* »	t_c 80mm $t'_v + t''_v$ (2 jrs) 48mm	D = 300 000 Lires environ D : S_p = 307f9 D : W = 27f5
Granit dur - 4m35 ... moyenne Pression maxima : 9k8	Fixe Type Pont de Lavaur $\widehat{A}^1$ Fr (> 40m) [4] (Tome II) *Sapin du Jura* *Pieux en chêne* Boîtes à sable	7 *25cm* 1m56 *30mm*	515mc 20695k 57360f	0mc71 28k6 79f2	A partir de 48°46' de la clef : 3 rouleaux. Au 1er roul. : 8 tronçons, 21 clavages. Aux 2e et 3e roul. : 8 tronçons, 5 clavages.	Cerveau de la voûte (sur 88°) chargé de 175mc de moellons *52 jours* 28 septembre	t_c 14mm t'_v Clef : 1mm3 A 15° : 0mm8 A 35° : 0mm3	Q = 6717mc Q : S_p = 7mc 69 Q : W = 0mc 45 D = 334 331f D : S_p = 383f2 D : W = 22f3 D : Q = 49f8

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER

PONT	PROJET — ENSEMBLE		PROJET — GRANDE VOÛTE					
	Longueur entre abouts des parapets Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs { *entre parapets* / *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Retombées*	ÉPAISSEURS — TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg 0m01² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
Date Symbole								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Pouch** *France* 1890 $\widehat{A}^1$ Fr (— 40m) 7	*56m 03* 10mm 15m 42	8m 90 (voie en courbe de 600m de rayon) *8m 30* Fruit : 1, 33 0m92	Arc de cercle **47m, 83** *13m 00* $\frac{1}{3,68}$ = 0,272 *28m 51*	**1m, 50** *2m, 627*	1m, 30 *2m 627*	Bandeaux et Douelle : PT [1] Queutage : MEV [1] Granit *Chaux du Teil — 350k*		1° 4 voûtes transversales, en plein cintre de 4m 90, sur piles de 1m 10 2° »
de **Freyssinet** *France* 1890-1891 $\widehat{A}^1$ Fr (— 40m) 8	*51m 79* 10mm 13m 16	8m 25 *7m 65* Fruit : 1 33 0m92	Arc de cercle **45m, 00** *11m 00* $\frac{1}{4,09}$ = 0,245 *28m 51*	**1m, 50** *2m 45*	1m, 30 *2m 45*	Bandeaux et Douelle : PT [1] Queutage : MEV [1] Granit *Ciment de Boulogne 500k*		1° 4 voûtes transversales, en plein cintre de 4m 50, sur piles de 1m 00 2° »
de **Jaremcze** *Autriche* 1893-1894 $\widehat{A}^1$ Fr (— 40m) 9	*185m* 11mm 27m	4m 50 *1m 50* Fruit : 1 20 1m 40	Arc de cercle **65m, 00** *17m 90* $\frac{1}{3,63}$ = 0,275 *38m 451*	**2m, 10** *3m, 40*	2m, 10 *3m 40*	PT [1] Grès (480k à 1180k) Aux voussoirs du queutage, on acceptait un démaigrissement de 1/8 de la surface de lit *Ciment Portland de Szczakowa (Galicie) 0mc 285* Joints de 18mm au moins	Pression maxima (sans surcharge) 27k 5 *Arc élastique* »	1° 8 voûtes transversales, en plein cintre de 3m 60 2° »
de **Jamna** *Autriche* 1893-1894 $\widehat{A}^1$ Fr (— 40m) 10	*121m 80* 11mm 19m 19	4m 50 » Fruit : 1 20 1m 45	Arc de cercle **48m, 00** *12m 00* $\frac{1}{4}$ = 0,25 *30m*	**1m, 70** *2m 60*	1m, 70 *2m 60*	PT [1] Grès En douelle, mêmes épaisseurs d'assises qu'aux bandeaux Aux voussoirs du queutage, on acceptait un démaigrissement de 1/8 de la surface de lit. *Ciment — 0mc 285*	Pression maxima (sans surcharge) 25k 1 *Arc élastique* »	1° 6 voûtes transversales, en plein cintre de 3m 50 2° »
de **Worochta** *Autriche* 1893-1894 $\widehat{A}^1$ Fr (— 40m) 11	» 12mm 16m 20	4m 50 » Fruit : 1 20 »	Arc de cercle **40m, 00** *10m 00* $\frac{1}{4}$ = 0,25 *25m*	**1m, 40** *2m 20*	1m, 40 *2m 20*	PT [1] Grès En douelle, mêmes épaisseurs d'assises qu'aux bandeaux Aux voussoirs du queutage, on acceptait un démaigrissement de 1/3 de la surface de lit *Ciment — 0mc 285*	Pression maxima (sans surcharge) 21k 4 *Arc élastique* »	1° 6 voûtes transversales, en plein cintre de 3m 00 2° »

1 Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

VOIE NORMALE — SÉRIE $\widehat{A}^1$ Fr ($\geqslant$ 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE *(Suite)*

FONDATIONS — [illegible]ture du sol. Profondeur [illegible] l'étiage. Pressions sur le sol kg 0m01². *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES: Type, *Matière*, Appareils de décintrement	FERMES: Nombre, *Épaisseur*, Écartement d'axe en axe, *Surhaussement*	Cube de bois, Poids de fer, Dépenses: Totaux	Cube de bois, Poids de fer, Dépenses: par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT: État d'avancement du pont; *Temps entre le dernier clavage et le décintrement*; Date	TASSEMENTS DE LA CLEF: sur cintre t_c; au décintrement t'_v; après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q — DÉPENSE D: Totaux et par unité de surface utile S_p [3], de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Rocher [illegible]s résistant [illegible] à 2m50 » *[illegible] taille suivant [illegible] lit Surface [illegible] en béton [illegible] ciment.*	Fixe. Type Pont Antoinette $\widehat{A}^1$ Fr ($\geqslant$ 40m)[5] (Tome II). » Boîtes à sable	6. 2,5m. 1m68. »			3 rouleaux. Aux 1er et 2e roul. 8 tronçons. au 3e rouleau: 4 tronçons.	». *55 jours*. 4 août	t'_v = 2mm2	Q = 4393mc; Q : S_p = 8mc30; Q : W = 0mc63; D = 143866f; D : S_p = 288f4; D : W = 20f6; D : Q = 32f8
Rocher [illegible]s résistant 1m à – 2m50 » »	*On a réemployé le cintre du Pont de Pouch* $\widehat{A}^1$ Fr ($\geqslant$ 40m)[7]				2 rouleaux. A chaque rouleau, 8 tronçons.	». *137 jours*. 6 avril		Q = 4336mc; Q : S_p = 10mc03; Q : W = 0mc82; D = 137418f; D : S_p = 317f9; D : W = 26f4; D : Q = 31f7
Rocher Grès » » *A sec*	Fixe. ». Coins	3. ». ». *120mm*			3 rouleaux. Au 1er rouleau: 8 tronçons. Aux 3 rouleaux, moellons posés à sec, puis joints matés.	Tympans achevés. ». Août	t_c = 115mm; t'_v – t''_v = 60mm	
Rocher	Fixe	*120mm*			2 rouleaux. Au 1er rouleau: 6 tronçons	Tympans achevés	t_c = 105mm	
Rocher Grès					A pleine épaisseur.			

Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER

PONT Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE *Longueur entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	GRANDE VOÛTE — INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Retombées*	ÉPAISSEURS — TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg $\overline{0^m01}^2$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENT DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
sur la **Gutach** *Allemagne* 1899-1900 $\widehat{A}$[1] Fr (40m) 12	*110m 82* 0 34m	5m 00 *1m 20* Fruit : 1/30 1m 15	Arc de cercle **64m 00** *16m 10* $\frac{1}{3{,}974}$ = 0,251 *39m 851*	**2m 00** *2m 80*	**2m 00** *2m 80*	PT[1] Grès des Vosges (Saverne) (400k à 600k) *Ciment Portland Schifferdecker* *0mc 333* *Sable de la Gutach*		1° 8 voûtes transversales, en plein cintre de 4m, sur piles de 1m35, 1m20, 1m00 2° »
sur le **Schwändeholzdobel** *Allemagne* 1899-1900 $\widehat{A}$[1] Fr (40m) 13	*118m 93* 7mm 42m	5m 20 (voie en courbe de 800m de rayon) *1m 10* Fruit : 1/30 1m 20	Arc de cercle **57m 00** *14m 25* $\frac{1}{4}$ = 0,25 *35m 625*	**1m 80** *2m 60*	**1m 80** *2m 60*	PT[1] Grès poreux, gelif. On refusa beaucoup de voussoirs *Ciment Portland Schifferdecker* *0mc 333*		1° 8 voûtes transversales, en plein cintre de 3m50, sur piles de 1m35, 1m20, 1m00 2° [illegible]
Chemnitz *Allemagne* 1901-1902 $\widehat{A}$[1] Fr (40m) 14	*116m* 10mm9 10m25	» *2m 70* Fruit : 1/10 »	Arc d'anse de panier **45m 00** *8m 60* $\frac{1}{5{,}23}$ = 0.191 *Rayon au cerceau : 42m50*	**1m 00** »		Petits moellons Aux têtes, crépi jouant la pierre de taille (Granit) »		
sur la **Diveria** *Italie* 1901-1902 $\widehat{A}$[1] Fr (40m) 15	» 22mm6 18m	» *8m 20* Fruit : 1/20 0m79	Arc de cercle **40m 00** *10m 00* $\frac{1}{4}$ = 0,25 *25m*	**1m 40** *2m 10* 14 ressauts à l'extrados	**1m 40** *1m 10*	Briques de Novare, pressées (450k) *Chaux hydraulique de Palazzolo — 400k*		1° Pas d'évidement 2° »
sur le **Strandeelven** *Norvège* 1902-1904 $\widehat{A}$[1] Fr (40m) 16	*58m 70* 15mm 19m (sol)	4m 70 *1m 80* Fruit : 1/20 1m35	Arc d'anse de panier à 3 centres **41m 00** *11m 25* $\frac{1}{3{,}645}$ = 0,274 *Rayons : Cerceau : 26m Reins : 21m75*	**1m 50** *2m 10*	**1m 50** *2m 10*	PT[1] grossière Gneiss (1000k à 2700k) Sur les reins, MOH[1] à ciment *Sable — 3 parties* *Ciment — 1 partie* *Joints de 25mm H 0 0 de mortier*	Pression maxima : Clef : 20k Retombées : 35k » 15 tonnes par mct	1° Pas d'évidement 2° »

1 — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement Tome III, p. II, n° 6

( ) — Mesurée sur un dessin

VOIE NORMALE SÉRIE $\widehat{A}^1$ Fr (⩾ 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE (*Suite*)

FONDATIONS …ture du sol Profondeur …s l'étiage Pressions sur le sol kg : 0m01² *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité de surface utile S_p [3], de volume « utile » W [5]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Gran… *…* »	Fixe Type Pont de Lavaur $\widehat{A}^1$ Fr (⩾ 40m) [4] (Tome II) » Boîtes à sable	5 » 1m20 *120mm*	Cintre et Pont de service ensemble 1000mc » 140000f dont, pour montage et démontage 51250f		2 rouleaux Au 1er rouleau, 6 tronçons Tous les voussoirs posés à sec	Voûtes d'évidement clavées » 9 juin	t_c 89mm t'_v 21mm t''_v (247 jrs) = 58mm	Q = 4734m Q : S_p = 6mc75 Q : W = 0mc35 D = 396114f D : S_p = 562f6 D : W = 28f5 D : Q = 83f3
Granit …s fissuré …	Fixe Type Pont de Lavaur $\widehat{A}^1$ Fr (⩾ 40m) [4] (Tome II) » Boîtes à sable	5 » 1m20 *120mm*	Cintre et Pont de service ensemble » » 103750f dont, pour montage et démontage 44775f		2 rouleaux	Voûtes d'évidement clavées *42 jours* 13 juillet	t_c = 99mm t'_v 21mm t''_v (215 jrs) 80mm	Q = 4000mc Q : S_p = 6mc46 Q : W = 0mc32 D = 319791f D : S_p = 517f1 D : W = 29f1 D : Q = 79f9
Gneiss								Q = 3700mc D = 150548f
	Fixe (Passe de s-20) » Boîtes à sable	7 *2.5cm* 1m37	355mc » »	0mc93 » »	Plusieurs attaques	» *15 jours* »	t_c 30mm t'_v 60mm	D = 284000 Lires
Roche	Fixe Boîtes à sable	5 *Bois ronds* Fermes de rive 1m25 Fermes interm. 1m15	» » 14582f	» » 49f1	2 rouleaux Joints maté-	» *357 jours* 14 septembre	t_c = 42mm t'_v 1mm5	Q = 2150mc Q : S_p = 8mc51 Q : W = 0mc56 D = 121103f D : S_p = 479f8 D : W = 31f9 D : Q = 56f3

…our le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A* 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER

PONT Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE *Longueur entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	GRANDE VOÛTE — INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Retombées*	ÉPAISSEURS — TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg $\overline{0^{m}01}^{2}$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENT DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
sur le **Krenngraben** *Autriche* 1904-1905 **Â**[1] Fr (= 40m)17	*62m* 14mm7 28m	4m94 (voie en courbe de 320m de rayon) *5m01* Fruit : 1/20 1m10	Arc de cercle **40m,00** *10m,00* $\frac{1}{4}$ = 0,25 *25m00*	**1m,50** *2m30*	**1m,30** *2m30*	Bandeaux et Douelle : MEV[1] Calcaire dur Aux têtes, bossages et ciselures Queutage : MOV[1] Granit *Ciment — 150k*	Pression maxima : 25k Surcharge: Machines / Tenders / Wagons Poids en T: 80T / 39T / 22T Longr entre tampons: 10m6 / 6m / 6m Essieux Nombre: 5 / 3 / 2 Ecartement: 1m4 / 1m5 / 3m Poids: 16T / 13T / 11T *Circulaire du Ministère des Chemins de fer 28 août 1904*	1° 6 voutes transversales vues, en plein cintre de 2m50 sur piles de 1m20 2° »
sur la **Steyrling** *Autriche* 1904-1905 **Â**[1] Fr (= 40m)18	*101m80* 2mm3 46m	4m75 *4m50* Fruit : 1/20 1m50	Arc de cercle **70m,00** *15m,70* $\frac{1}{4,45}$ = 0,225 *46m86*	**2m,00** *3m40*	**2m,00** *3m40*	PT[1] Granit En douelle, mêmes épaisseurs d'assises qu'aux bandeaux *Ciment Portland 0mc333*	Pression maxima : 37k Surcharge : Comme au Pont sur le Krenngraben **Â**[1] Fr (= 40m)17	1° 10 voutes transversales vues, en plein cintre de 3m25, sur piles de 1m25 à 1… 2° »
de **Salcano** *Autriche* 1904-1906 **Â**[1] Fr (= 40m)19	*219m70* 3mm RD Rc 37m	5m50 G *5m60 au niveau de la voie* Fruit : 1/20 0m87	Arc de cercle **85m,00** *21m,80* $\frac{1}{3,898}$ = 0,257 *52m33*	**2m,10** *3m50*	**2m,10** *3m50*	PT[1] (0mc2 à 0mc7) Calcaire de Nabresina (1200k en cubes de 6cm) Lits soigneusement taillés *Ciment Portland 1er choix de Spalato — 0mc333* *Sable de l'Isonzo lavé* *Joints de 16mm*	Pression maxima : Clef : 28k Joint de rupture : 51k Retombées : 40k *Arc élastique* Surcharge : Comme au Pont sur le Krenngraben **Â**[1] Fr (= 40m)17	1° 10 voutes transversales vues, en plein cintre de 3m40 à … sur piles de 1m35 à 1… 2° »
de **Svenkerud** *Norvège* 1905-1907 **Â**[1] Fr (= 40m)20	*90m* 0 16m50 Basses eaux 31m Fond du lit	4m70 *4m80* Fruit : 1/20 1m10 jusqu'au dessus de la plinthe	Arc d'anse de panier à 3 centres **44m,00** *6m,60* $\frac{1}{6,66}$ = 0,15 *Rayons : Cerceau : 44m* *Reins : 30m80*	**1m,60** *2m50*	**1m,60** *2m50*	PT[1] grossière Grès (900k à 1500k) Sur les reins, MOH[1] à ciment *Sable : 2,5 parties* *Ciment : 1 partie* *23 % de mortier*	Pression maxima : Clef : 30k3 Joint de rupture : 35k8 Retombées : 28k1 » 15tonnes par m.ct	1° Pas d'évidement 2° »

[1] Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

(*) = Mesurée sur un dessin

FONDATIONS …ure du sol Profondeur …us l'étiage Pressions sur le sol kg : $0^{m}01^2$ *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	FERMES Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité de surface utile S_p [3], de volume utile W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Éboulis compacts …nglomérat… Pression maxima : 3k 5 *…ate forme …n béton, …rmé …n grillage I croisés*	Fixe » Billots à base évidée Zuffer	**5** *Étage supérieur* 20c m *Au-dessous, bois ronds de* 20c à 25c 1 m 60 *100mm*	» » 13125f	» » 49f 5		Voûte nue » 8 mai	t'_v 2mm	
Éboulis compacts Pression maxima : 7k 5 *A sec …ate forme …éton à 1-12, armé …fers ronds*	Fixe » Billots à base évidée Zuffer	**5** *30c × 12c* 1 m 50 *250mm*	866mc » 42000f	1mc 72 » 83f 3	3 rouleaux Même mode de construction qu'au Pont de Salcano $\widehat{A}^1$ F^r (> 40^m) [19]	Piles sur la grande voûte achevées jusqu'aux retombées des voûtes d'évidement » Été	t_c 130mm t'_v 9mm	Q = 4395mc Q : S_p = 9mc 52 Q : W = 0mc 33 Fondations / Élévation / Ensemble D : 42000f / 525000f / 567000f D : S_p : 86f 9 / 1085f 7 / 1172f 6 D : W : 3f 0 / 37f 5 / 40f 5 D : Q : » / » / 123f 4
…ive gauche : …nglomérat …erneux. *…ive droite : Éboulis.* Pression …yenne : 4k *…tes-formes béton armé de 2m 20 d'épaisseur*	Fixe *Pin* Billots à base évidée Zuffer	**7** *Étage supérieur* 20c à 28c *Étage interm.* 20c à 25c *Étage infér.* 21c à 32c 1 m 30 *220mm*	1209mc 10000k 287910f dont, pour la pile en rivière 142590f	1mc 51 12k 5 359f 9	5 assises à pleine épaisseur, puis, 3 rouleaux Au 1er roul. 8 tronçons.	Piles sur la grande voûte achevées jusqu'aux retombées des voûtes d'évidement *38 jours* 8 août	t_c 40mm aux reins : 60mm t'_v 6mm	Ouvrage entier / Grand pont et pilastres Q : 14300mc / 9420mc Q : S_p : 11mc 8 / 15mc 4 Q : W : 0mc 49 / 0mc 43 D : 1137360f / 975030f D : S_p : 944f 5 / 1598f 4 D : W : 39f 32 / 50f 22 D : Q : 79f 5 / 103f 5
Rocher , A sec	Retroussé sur 43m Arc à treillis en bois et métal, à 2 articulations » Boîtes à sable	**5** » Fermes de rive 1 m 20 Fermes intermédiaires 1 m 00 »	» » 22000f	» » 84f	3 rouleaux Joints matés	Tympans achevés *108 jours* 2 mai	t_c 49mm t'_v 5mm 5 à 7mm	Q = 1800mc Q : S_p = 4mc 65 Q : W = 0mc 26 D = 148 300f D : S_p = 383f 2 D : W = 22f 4 D : Q = 82f 4

…ur le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — A. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — B

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER

PONT Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE *Longueur entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	GRANDE VOÛTE — INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Retombées*	ÉPAISSEURS — TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg 0m01² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Langenbrand** *Allemagne* 1907-1909 $\widehat{\mathbf{A}}^1$ Fr (40m)21	*150m* 22mm 25m	4m 70 *1m 20* Fruit 1/30 1m20	Arc de cercle 59m,00 *14m 75* $\frac{1}{4}$ = 0,25 *36m878*	1m,80 *2m 60*	1m,80 *2m 60*	PT[1] Granit *Ciment 160k (1v, 3v)* *Joints de 2cm*	Pression maxima : avec surch. / sans surch. Clef 30k5 / 21k5 Joint de rupt. 41k1 / 27k3 Retomb 39k4 / 26k3	1° 8 voûtes transversales vues, en plein cintre de 3m90, sur piles de 1m00 à 1m35 2° »
de **Lusserat** *France* 1908-1910 $\widehat{\mathbf{A}}^1$ Fr (40m)22	*81m28* 10mm 14m25	8m 08 *8m 10* Pas de fruit 0m99	Arc de cercle 45m,70 *9m 87* $\frac{1}{4,63}$ = 0,216 *31m 39*	1m,45 *2m,80*	1m,45 *2m 80*	Bandeaux : PT[1] Douelle : MAV[1] Queutage : MOV[1] *Ciment Portland de Boulogne — 150k* *Joints dans une même assise 5cm entre 2 assises 1 à 3cm*	Pressions : MAX. / moy. Clef 28k / 18k A 11m de la clef 25k / 15k Retomb. 12k / 10k *Arc élastique* *Méthode analytique de M. Résal* 1150k m²	1° Pas d'évidement 2° *Archivolte*
de **Boïlefos** *Norvège* 1908-19.. $\widehat{\mathbf{A}}^1$ Fr (40m)23	*71m* 11mm1 18m50	4m 85 (voie en courbe de 250m) *1m 25* Fruit : 1/20 0m95	Arc d'anse de panier à 3 centres 40m,00 *10m 00* $\frac{1}{4}$ = 0,25 *Rayons :* *Cerveau 28m50* *Reins 21m678*	1m,40 *2m,30*	1m,40 *2m 30*	PT[1] grossière Gneiss (1100k à 2100k) Sur les reins, MOH[1] à ciment *Ciment*	Pression maxima : Clef : 20k Joint de rupture : 30k8 Retombées : 27k » Surcharge : 15t par ml	1° Pas d'évidement 2° »
de **Lichtensteig** *Suisse* 1907-1909 $\widehat{\mathbf{A}}^1$ Fr (40m)24	*98m50* 0 15m40	7m 40 1 voie 5m40 1 passage pour piétons 2m00 *5m 20* Pas de fruit 2m00	Arc de cercle 42m,82 *11m 511* $\frac{1}{3,709}$ = 0,269 *25m619*	1m,40 *2m,70*	1m,40 *2m 70*	MEV[1] Grès calcaire, assisé *Ciment Portland 0mc333*	Pression maxima sans surcharge : Clef : 19k8 avec surcharge : Clef : 27k5 Joint de rupture : 28k9 Retombées : 23k2 *Arc élastique* *Méthode graphique Ritter* 1800k m²	1° 8 voûtes transversales vues, en plein cintre de 3m50, sur piles de 1m à 1m25 2° *Clef et Contre-clefs en libages*

1 — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. 11, n° 6

VOIE NORMALE SÉRIE $\widehat{A}^1$ $F^r (\geqslant 40^m)$

TABLEAU SYNOPTIQUE *(Suite)*

FONDATIONS *...ture du sol* ...rofondeur ...s l'étiage Pressions sur le sol kg 0m01² *Procédé* 10	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement 11	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement* 12	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux 13	par mq de douelle [2] 14	MODE DE CONSTRUCTION 15	DÉCINTREMENT État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date 16	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v 17	CUBE DE MAÇONNERIE À MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]. 18
Granit » Pression ...axima ... ...vec ...harge 5k6 ...ns ...harge : 5k »	Fixe » Vérins à vis	4 *Étage supérieur* 2,5 *Étage inférieur* 10 1m50 *150mm*	270mc 5090k 17893f	0mc 74 13k 9 48f 8	2 rouleaux 6 attaques Voussoirs du 1er rouleau posés à sec, puis, après fermeture de la voûte, remplis de mortier à 1 3	Voûte nue *56 jours* 8 février	t_c 52mm $t'_v + t''_v$ 7mm	Q 4 120mc Q : S_p 5mc 84 Q : W 0mc 24 — Fondations / Élévation / Ensemble D : 16536f / 291964f / 308500f D : S_p : 23f2 / 414f4 / 437f6 D : W : 1f3 / 22f8 / 24f1 D : Q : » / » / 74f9
Calcaire tendre (tuffau) ...ve droite - 12m80 *comprimé* ...ve gauche *...ssements* ...ressions ... ... surcharge ...max = 10k ...veine : 6k4	Retroussé sur 10m (passe marinière) » Boites à sable	6 *25cm* 1m49 *10mm*	au dessus / au dessous des boites à sable 184mc / 298mc 8T / 4T 9 19791f / 35619f Ensemble 483mc 12T 9 55410f	 1mc 22 32k 4 139f 5	3 rouleaux Au 1er roul. : 13 tronçons, 14 clavages. Au 2e : (sur les reins seulement) 2 tronçons. Au 3e : 4 tronçons.	Voûte nue *18 jours* 26 octobre	t_c < 10mm t'_v = 3mm6	— Fondations / Élévation / Ensemble Q : 2014mc / 3535mc / 5549mc Q : S_p : 2mc 93 / 5mc 14 / 8mc 07 Q : W : 0mc 22 / 0mc 38 / 0mc 60 D : 170550f / 206669f / 377219f D : S_p : 248f3 / 300f9 / 549f2 D : W : 18f3 / 22f2 / 40f5 D : Q : 84f7 / 58f5 / 68f0
	Retroussé sur 32m Grands arbalétriers *Bois rond* Boites à sable	6 » 1m00			3 rouleaux			D = 132 000f environ D : S_p = 383f3 D : W = 22f7
Marne et nagelfluh (Poudingue ...) ... Pression ...axima 9k	Fixe Poteaux et contrefiches » Billots à base évidée	6 *22cm* 1m00 *80mm*			2 rouleaux, chacun en 8 tronçons. Joints secs au-dessus des points fixes du cintre. 1er rouleau clavé avant la construction du 2e.	Piles des voûtes d'évidement construites. » Juin	t_c 40mm t'_v 0	Q 3 760mc Q : S_p 5mc 15 Q : W 0mc 49 D = 128 200f D : S_p = 175f9 D : W = 16f8 D : Q = 34f1

...ur le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER

PONT Date Symbole	PROJET ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	GRANDE VOÛTE INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS CORPS Clef *Retombées*	TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg/0m01² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Krummenau** *Suisse* 1910-1911 $\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ F^{r} (~ 40^{m})25	*94m31* 21mm 18m20	4m60 *4m28* Fruits : des tympans 1/50 des bandeaux 1/40 1m20	Arc d'anse de panier à 3 centres **63m,26** *13m85* $\frac{1}{4,567}$ = 0,218 *Rayons :* *Cerveau 14m46* *Reins 38m14*	1m,80 *2m72*	1m,80 *2m72*	L [1] Grès calcaire (Mollasse) 1200k *Ciment Portland* *0mc333* *Joints de 1cm à 6cm*	Pressions : MAX. / moy. sans surcharge : Clef 24k8 / 21k2 Retomb. 20k3 / 17k9 avec surcharge : et variation de température de ± 15°, sans tenir compte de la résistance à la tension. Clef 36k2 / 23k6 Retomb. 46k2 / 23k1 *Arc élastique* 1700k m²	1° 10 voûtes transversa- vues, en plein c de 3m50 sur piles 1m à 1m20 2° »

1 Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, page II, n° 6.

VOIE NORMALE **SÉRIE $\widehat{A}^1$ Fr (> 40m)**

TABLEAU SYNOPTIQUE (*Suite*)

EXECUTION									CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q
FONDATIONS	GRANDE VOÛTE								DÉPENSE D
	CINTRE					MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT	TASSEMENTS DE LA CLEF	
	FERMES		Cube de bois Poids de fer Dépenses						
…ture du sol Profondeur …s l'étiage Pressions sur le sol kg (0m01)² *Procédé*	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Totaux	par mq de douelle[2]			État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	Totaux et par unité de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4].
10	11	12	13	14		15	16	17	18
N…ge Dub… …ng… …merat …soudé… Pression …xima : 12k …e gauche : *…usements …ans …atardeau, …is béton …erge.*	Fixe Poteaux et contrefiches Billots à base évidée Zuffer	6 22cm 0m96 *130mm*	Cintre 217mc Palées 49mc3 Divers 18mc7 Bois 285mc0 Fers 8000k (sabots des pieux 300k) Dép. 25500f	0mc77 21k6 68f9		4 rouleaux les 2 premiers en 8 tronçons. Joints secs, maintenus par des coins en bois, au-dessus des points fixes du cintre. Les 2 1ers roul. clavés ensemble	Piles des voûtes d'évidement construites *29 jours* 8 septembre	moyenne des 2 têtes t_c 25mm2 t'_v 3mm2 t''_v 23mm (pont achevé)	Q = 2094mc Q : S_p = 4mc82 Q : W = 0mc36 Fondations : 25000f Élévation : 104000f D = 129000f D : S_p = 297f4 D : W = 22f2 D : Q = 61f6

…ur le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\widehat{A}^1 F^r_{(> 40^m)}$

MONOGRAPHIES

PONTS SUR LA SCRIVIA, PRÈS DE MARETTA ET DE PRAROLO

(ITALIE, — Province de Gênes)

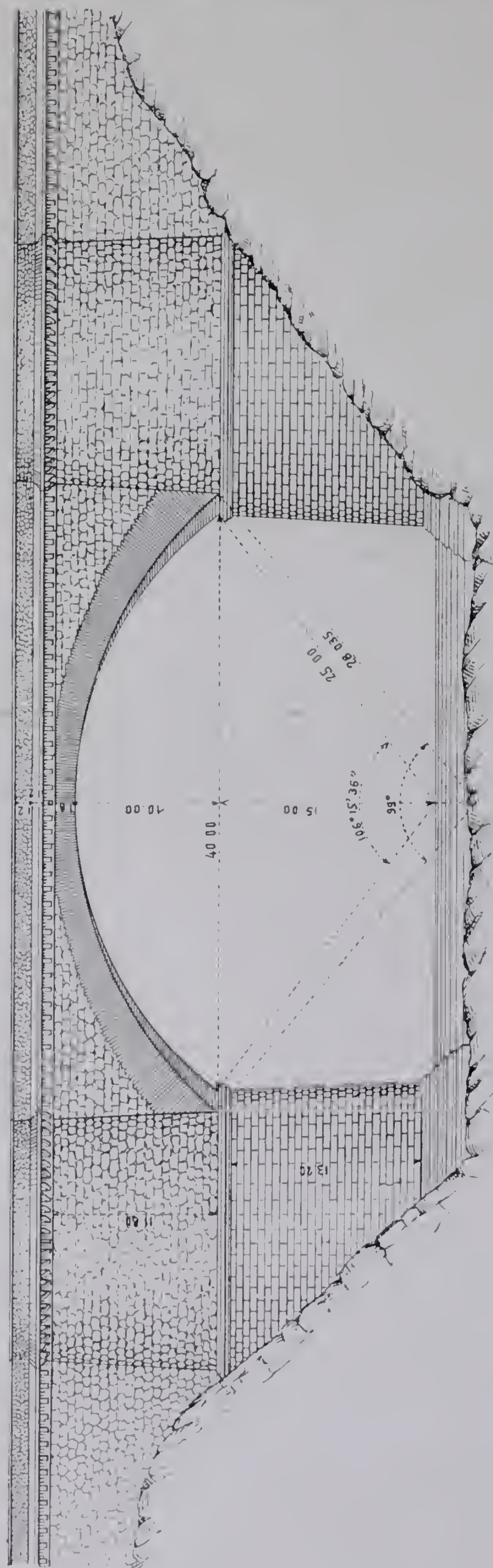
Ligne de Novi à Gênes[1]

1851-1852 $\widehat{A}^1 F^r_{(> 40^m)}$ 1 et 2

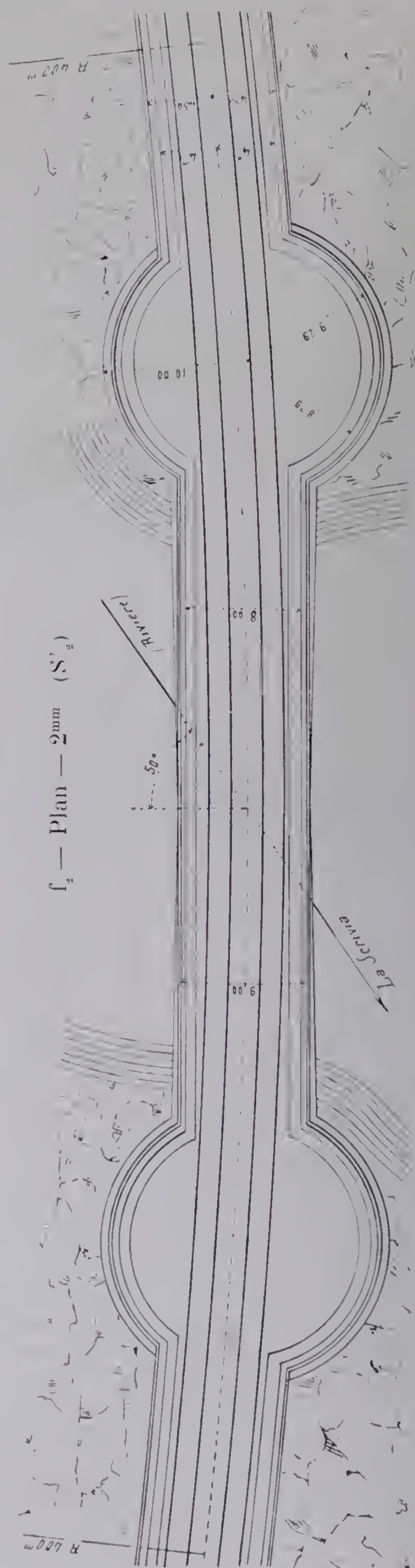
Φ1. — Pont de Maretta (S_3)



1. — Entre les stations d'Arquata et d'Isola del Cantone, le pont de Maretta à 3k620 de celle-ci, le pont de Prarolo à 2k030.



f_1 — Élévation — 2^{mm} (S'_2)



f_2 — Plan — 2^{mm} (S'_2)

1. Pourquoi on a fait une grande arche. — Parce que les eaux de crues montent à 12m, et vont vite.

Φ_2 — Pont de Prarolo (S_3)



2. Disposition en vue :

A. - du biais de 50°. — Pour éviter un appareil biais, on a construit les culées en forme de tronc de cône à fruit de 1/20, et engendré l'intrados par un arc de cercle de flèche constante (10m) et de corde variable, se déplaçant parallèlement au plan vertical de l'axe du pont, et s'appuyant sur les circonférences, intersections des tours-culées avec le plan horizontal des naissances.

La douelle est ventrue au milieu : cela ne choque pas.

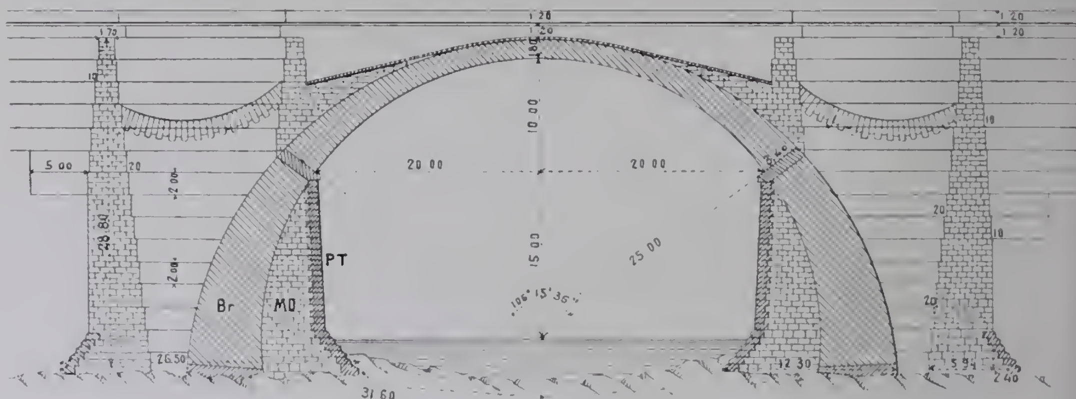
L'intrados sur l'axe est un arc de 40m au 1/4 ; il se prolonge derrière ses pieds-droits, et est réellement un plein cintre complet de 50m (f_3).

B. - de la courbe de 400m. — Les têtes sont parallèles à la corde de 40m du tracé.

C. - de la pente de 8mm. — Le parapet est horizontal : la pente est répartie sur les trottoirs et le ballast.

3. Matériaux. — Les voûtes et leur prolongement dans la culée sont en briques s'écrasant en moyenne à 54^k74, soit un peu plus de 4 fois la pression maxima, évaluée à 12^k51.

f_3 — Coupe en long — $1^{mm}5$ (S'_2)



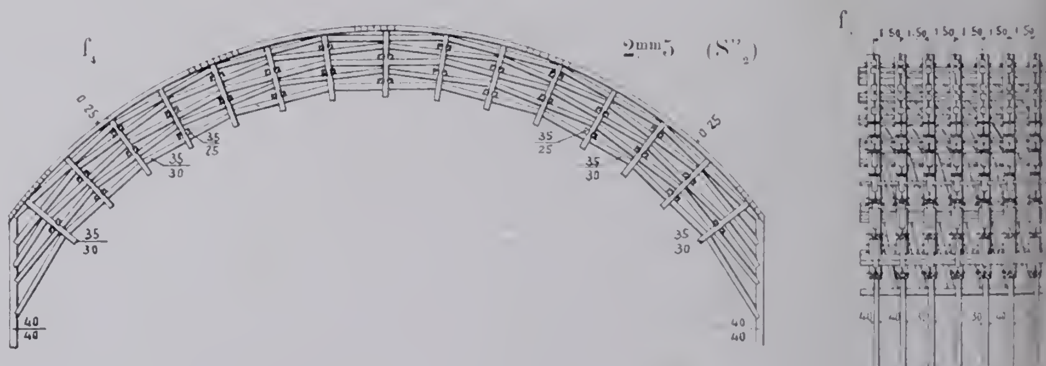
Les briques des voûtes, de $26^{cm} \times 13^{cm}$, n'étaient pas en forme de voussoirs : on en employait de diverses épaisseurs ($6^{cm}5$, – $6^{cm}7$, – 7^{cm}), et on augmentait celle des lits de mortier jusqu'à 6^{mm}.

La brique paraît bien conservée.

L'extrados est en courbe continue à Maretta ; avec crossettes, à Prarolo.

Au-dessus du cordon, les tours sont revêtues de gros moellons gris à Prarolo, de briques à Maretta.

4. Cintre. — « *Le cintre avait été projeté.... pour une voûte en pierre de* « *taille.*



« *Il est constitué de 7 fermes composées chacune de cinq rangs d'arbalétriers* « *disposés suivant le système adopté par M. Peronnet au pont de Neuilly.* » (S…

5. Fondations. — La culée rive droite du pont de Prarolo a été fondée sur le roc vif ; mais, à la culée rive gauche, on a trouvé un banc d'argile bleue, compressible. Quand on y battait un pieu, on faisait remonter le pieu voisin[2]. On posa sur l'argile un fort grillage en chêne, et on donna un grand empatement[3] au massif de fondation.

6. Dates. — Tassements.

	Maretta	Prarolo
Construction de la voûte	10 septembre / 14 octobre 1851	1852
Décintrement	14 février 1852	immédiatement après l'achèvement de la voûte
Tassement du cintre chargé des briques de la voûte	180mm	80mm, sans aucune déformation
Tassement de la voûte au décintrement	15mm	
En tout	195mm	
Surhaussement donné au cintre	250mm	250mm

7. Personnel. — Ingénieur en chef : M. Ranco.

2. — « *La compression sur un point réagissait à des distances incroyables. Les remblais d'accès de « la culée gauche du pont, lorsqu'ils sont arrivés à 18m de hauteur, ont causé la chute d'un moulin placé « à la distance de 200m de ces remblais.* » (S_1).

3. — L'étymologie impose « empattement ». Mais l'Académie, au regret de Littré, écrit « empatement ».

SOURCES :

S_1. — (Texte). — Notice sur le projet et la construction des Ponts de 40m d'ouverture sur la Scrivia, près de Maretta et de Prarolo (Chemin de fer de Gênes à Turin), Chambéry, le 29 novembre 1860, M. Ranco (Bibliothèque de l'École des Ponts et Chaussées, Manuscrits, n° 1790).

S_2. — (Dessins).

S'_2. — Collection des Dessins distribués aux Élèves de l'École des Ponts et Chaussées, 3e série, section A, Pl. 4.

(La légende explicative, tome I, p. 74 à 79, est empruntée à S_1).

S''_2. — Dessin à 1/50 communiqué par M. Ranco (Bibliothèque de l'École des Ponts et Chaussées, Manuscrits, n° 1790).

S_3. — Ce que j'ai vu — octobre 1908.

PONTS SUR LA SCRIVIA, PRÈS D'ISOLA DEL CANTONE[1, 2]

(ITALIE, – Province de Gênes)

Ligne de Novi à Gênes

1852 $\widehat{A}^1$ F^r (> 40^m) 3 et 4

Φ_1 — Pont en amont d'Isola del Cantone (S_2)



Voici les seuls renseignements que j'ai trouvés sur ces 2 ponts :

« Dans l'intervalle de tems qui s'est écoulé entre le décintrement du pont de « Maretta et celui de Prarolo, nous avions dû achever deux autres ponts à un seul « arc de la même ouverture (10^m), dont la voûte était aussi en briques. Nous avions « décintré ces deux arcs, l'un après un mois et l'autre après deux mois de leur « clôture. On avait obtenu un abaissement, mesuré à la clef de la voûte, de $3^{cm}1/2$ « pour le premier et de 5^{cm} pour le second. » (S_1).

1. — L'un, à 1^k518 en amont, c'est-à-dire vers Ronco, de la station d'Isola del Cantone, l'autre, à 1^k437 en aval, c'est-à-dire vers Arquata.

2. — Dans la statistique des Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1886, p. 542^{quater}, Ponts nos 41, 42, j'ai, d'après M. Clericetti, Professeur à l'Ecole des Ingénieurs de Milan, donné ces deux ponts sous les noms de Battaglia et Premna : il n'y a pas, dans le voisinage, de villages de ce nom.

Au pont d'aval, l'extrados est à crossettes comme à Prarolo[4]. Au pont d'amont, il est en courbe continue comme à Maretta[5].

La brique paraît bien conservée.

Φ_2 — Pont en aval d'Isola del Cantone (S$_2$)



Aux deux ponts, les murs en retour sont plans, et non arrondis comme à Prarolo[4] et Maretta[5] : ils sont revêtus de grosses assises de brèche.

4. — $\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ F^{r} (> 40^{m})2

5. — $\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ F^{r} (> 40^{m})1

SOURCES :

S$_1$. — Notice sur le projet et la construction des Ponts de 40^{m} d'ouverture, sur la Scrivia, près de Maretta et de Prarolo (Chemin de fer de Gênes à Turin), Chambéry, 29 novembre 1860, M. Ranco (Bibliothèque de l'École des Ponts et Chaussées, Manuscrits n° 1790).

S$_2$. — Ce que j'ai vu — octobre 1908.

PONT SUR L'OGLIO, PRÈS DE CALCIO[1] *(ITALIE, – Lombardie)*

Chemin de fer de Milan à Venise. – Section de Treviglio à Rovato

1877–1878 $\widehat{A}^1$ F^r (> 40m)5

Φ_1 (S.)



1. Choix de l'ouverture. — Les Ingénieurs avaient jugé suffisante pour les crues l'ouverture de 36ᵐ. On l'a portée à 42ᵐ, pour satisfaire la ville de Cremone, propriétaire du canal navigable partant de l'Oglio à 300ᵐ en aval.

2. Matériaux. — Par économie, on a fait en briques (40f50 le m. c.) toute la grande voûte : bandeaux, douelle et corps.

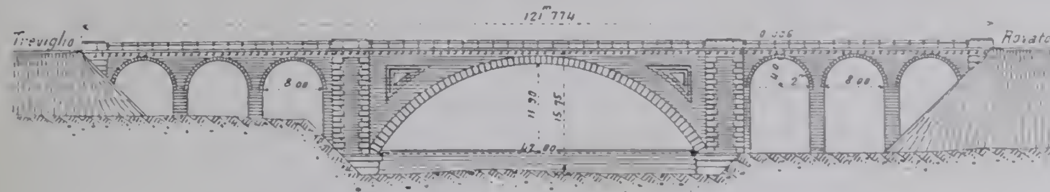
Pour accidenter les bandeaux, on a fait ressauter des groupes de 8 assises, séparés par deux assises en retraite.

La différence de 0m98 entre les épaisseurs de la voûte à la clef et aux reins est rachetée par 6 ressauts de 0m14.

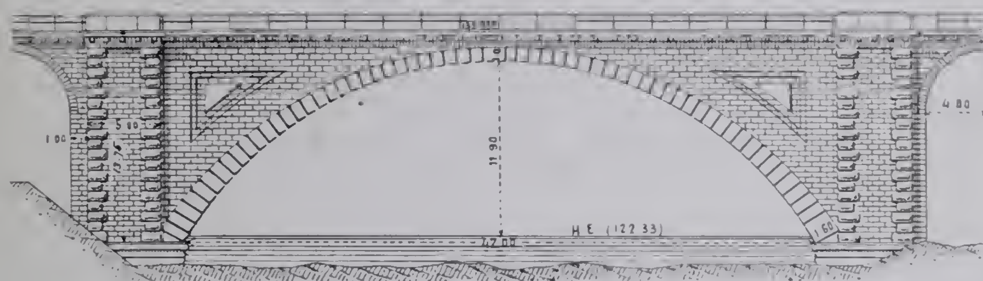
On a placé les matériaux les moins résistants, là où il y a le plus à porter.

1. — Entre Calcio et Chiari, à 1k600 environ de Calcio.
Dans la statistique (Annales des Ponts et Chaussees, octobre 1886, « *Construction des Ponts du « Castelet, de Lavaur et Antoinette* », p. 542ter, n° 32), je l'ai appele Pont de Rovato.

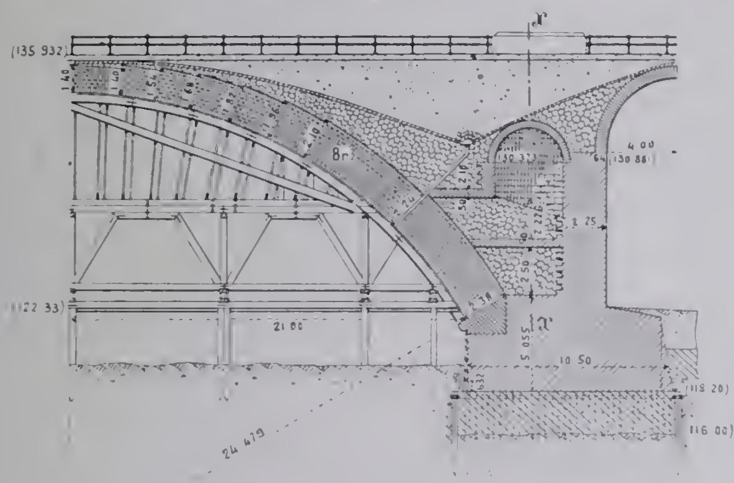
f_1 — Ensemble — 1^{mm}



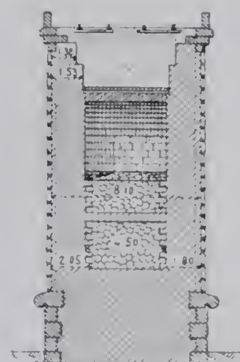
f_2 — Grande voûte — 2^{mm}



f_3 — Coupe en long et cintre — $2^{mm}5$



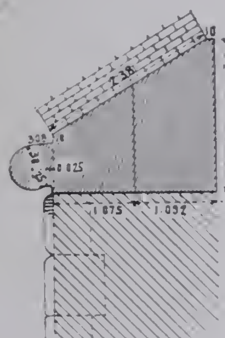
f_4 — Coupe en travers sur $x.x$ de f_3 — $2^{mm}5$



f_5

Imposte

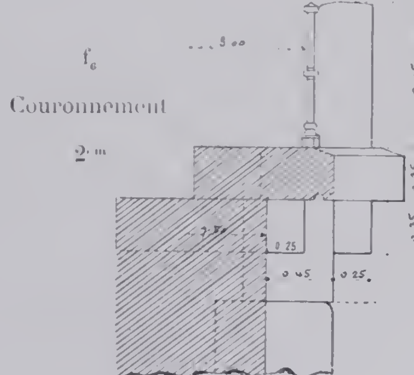
1^{cm}



f_6

Couronnement

2^{cm}



Sur la grande voûte, qui est en briques, reposent les tympans en calcaire assisé, faisant cadre autour d'un triangle de grosses pierres de taille.

Ce cadre eût pu demeurer vide, sans dommage pour l'aspect.

Aux pilastres, deux vigoureuses chaînes d'angle enserrent de petits moellons ; il eût fallu tout revêtir en gros appareil.

3. Construction de la grande voûte. — La voûte, en briques (785^{mc}), a été construite en 25 jours par 24 maçons.

Quand la voûte fut montée à 21^{m} de ses naissances, on observa, à 14^{m} d'elles, une fente de 1 2^{mm} pénétrant à 0^{m}50.

4. Personnel[2].

Projet et Direction des Travaux : M. le Commandeur Cesare Bermani, Ingénieur de la Division des Chemins de fer de la Haute-Italie.

Entrepreneurs : MM. Bianchi-Bellati.

2. — Renseignements gracieusement communiqués, sur l'invitation de M. le Commandeur Cajo, par M. Edouard Garneri, Chef du Service de l'Entretien des Chemins de fer de l'Etat, à Bologne (Mars 1911).

SOURCES :

S_1. — La Ferrovia Treviglio-Rovato : « *Ponte Viadotto sul fiume Oglio* », p. 12 à 18, Pl. 4 et 5, note de M. Cesare Bermani, datée de Milan : 18 mars 1878.

S_2. — Ce que j'ai vu — juin 1908.

PONT SUR LA VÉZÈRE, AU GOUR-NOIR (CORRÈZE)

Ligne de Limoges à Brive, par Uzerche [1]

1888-1889 $\widehat{\mathbf{A}}^1$ F^r (= 40^m,6)

Φ_1 — amont (S_4)



1. Pourquoi on a fait une grande voûte. — Le tracé coupe la rivière sous un angle de 56°. C'est pour éviter des piles biaises dans une rivière à crues fréquentes et brusques, qu'on a jeté cette grande voûte par-dessus un îlot de granit.

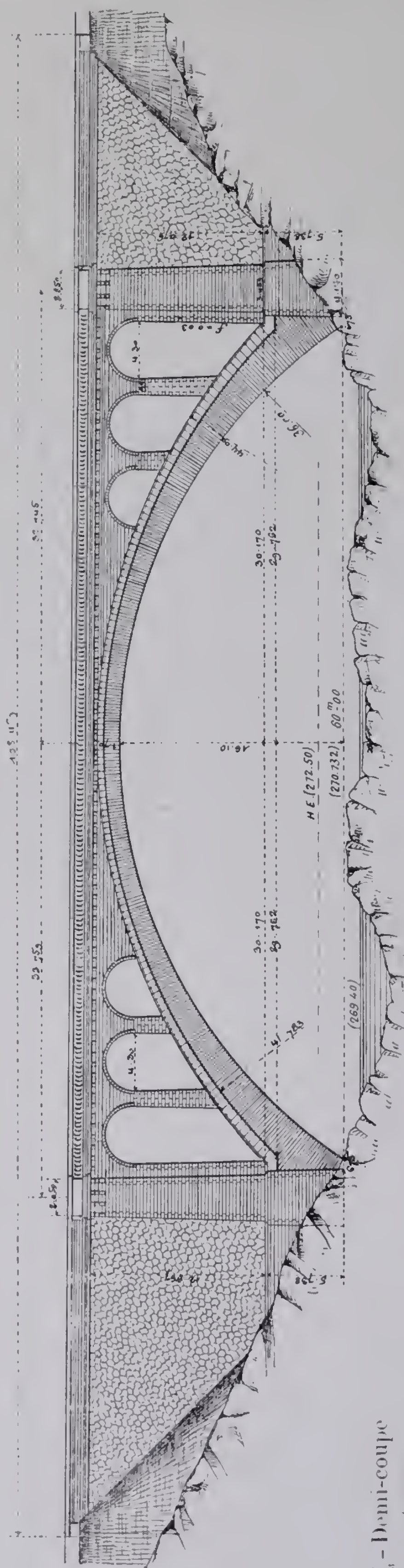
2. Bandeau et archivolte (Φ_1, f_1). — Les queues des voussoirs du bandeau sont sur une courbe parallèle — à l'intrados, au-dessous du milieu de la voûte, — à l'extrados, au-dessus.

Le bandeau, en fruit de 5^{cm}, est relevé par une archivolte en fruit de 6^{cm}, dont l'épaisseur est le 1/4 de celle du bandeau.

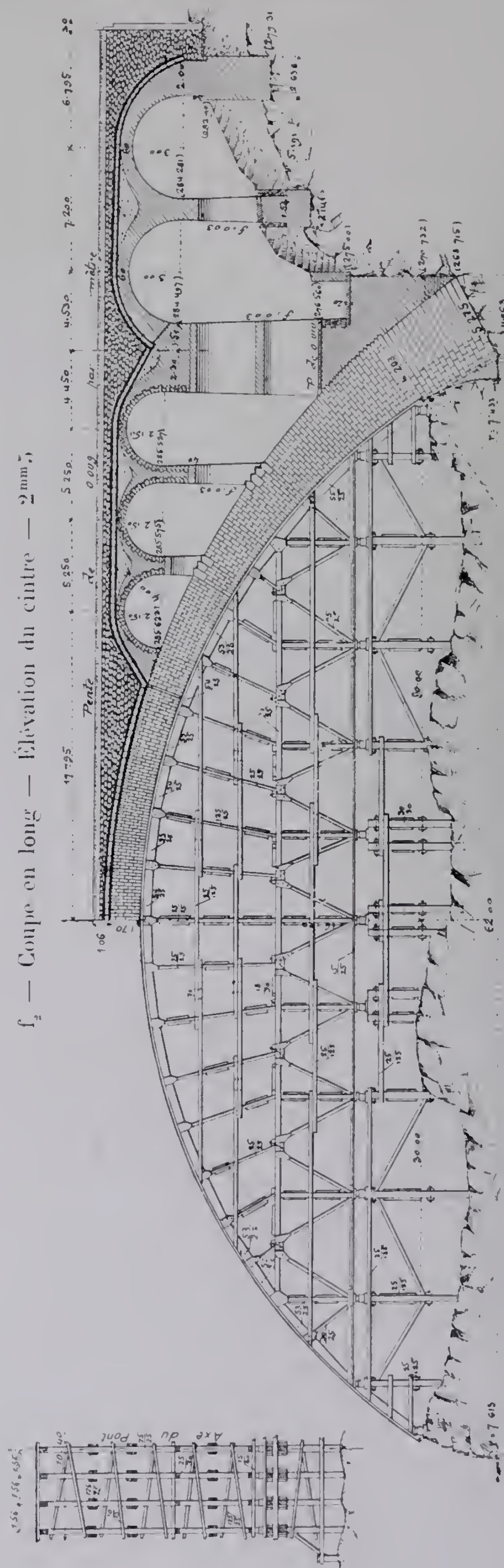
Sur un bandeau en moellons à bossages, une archivolte lisse, et qui est restée claire, ne paraît pas à sa place. Son retour horizontal aux reins semble court.

3. Pilastres des culées (Φ_1, f_1). — Appliqués contre les murs pleins des culées, ils ne les arrêtent pas, ne les détachent pas du corps central.

1. — Entre les stations d'Uzerche et de Vigeois, à 3^k940 d'Uzerche.



f₁ — Élévation — 2mm



f₂ — Coupe en long — Élévation du cintre — 2mm5

f₃ - Demi-coupe en travers du cintre - 2mm5

4. Joints vus d'extrados. — Sur les parties vues de l'extrados, les joints ont été dégradés, puis bourrés de mortier pulvérulent de ciment.

5. Cintre. — *A. Description.* — Il est imité de celui du pont de Lavaur [2].

Φ_2 [3]



Les pieux, coupés d'équerre, armés à leur base d'une tôle de 2^{cm}, étaient scellés au mortier pulvérulent de ciment, dans des trous forés [4] dans le rocher, quelques-uns au trépan, la plupart à l'aiguille, à l'abri de batardeaux (10 mai-7 août 1888) (S_3).

Les vaux, d'une seule pièce, avaient 4^m de longueur au plus ; les couchis de $10^{cm} \times 15^{cm}$, d'une seule pièce, étaient espacés de 40^{cm} aux reins, de 21^{cm} à la clef.

Le platelage, de 25^{mm}, était en lames de 4^m au moins, assemblées à rainures et languettes.

Les assemblages étaient recouverts, sur leurs deux faces, de tôles de 7^{mm}.

Le cintre a été taillé du 25 juillet au 27 août 1888.

Pour tenir compte de la saillie des bossages de la douelle, on avait donné au cintre un rayon inférieur de 4^{cm} à celui de la douelle. Les moellons de douelle, dont le bossage était inférieur à 4^{cm}, étaient posés sur cales de chêne.

2. — $\widehat{A}^1$ F^r ($\geqslant 40^m$)4 - 1882-1884 — Tome II.
3. — Photographie gracieusement communiquée par l'Ingénieur du Pont, M. Draux.
4. — Le mètre courant de forage a coûté : au trépan, 318f20 : à l'aiguille, 40f90.

B. Quantités et dépenses.

		Au-dessous des boites à sable	Au-dessus des boites à sable	Ensemble
Cube de bois		169mc359	345mc911	515mc270
Poids de fer		3795k	16900k	20695k
Dépense	Fourniture	11947f89	19121f85	31069f74
	Main-d'œuvre	19000f	7289f93	26289f93
	Ensemble	30947f89	26411f78	57359f67
	par mètre cube de bois	*182f71*	*76f36*	*259f10*

6. Exécution de la grande voûte. — *A. Division en rouleaux et tronçons* — Les 20 premières assises au-dessus de la retraite, jusqu'à la semelle supérieure des boîtes à sable à 48°46', ont été construites à pleine épaisseur, à mortier de ciment à 800k.

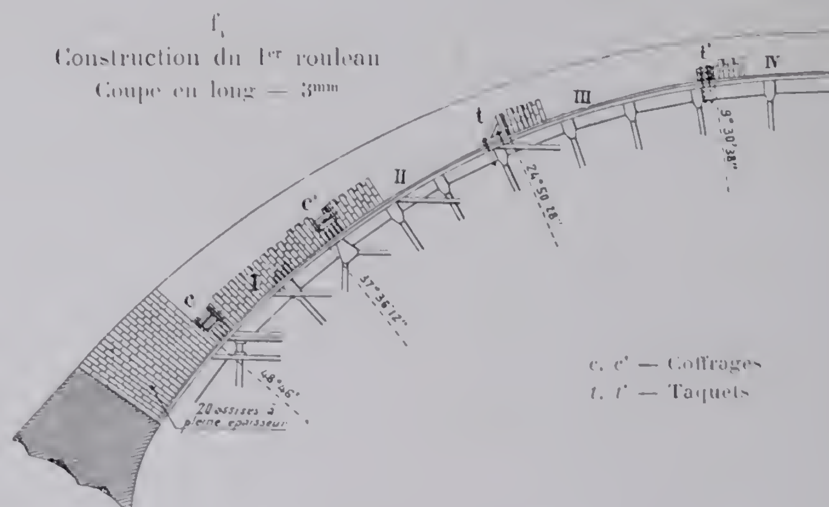
Au-dessus, la voûte a été construite en 3 rouleaux (S_1), divisés chacun en 8 tronçons.

On chargea le cintre, du 27 février au 5 mars 1889, de 546mc de moellons et de pierres cassées : il tassa de 8mm ; quand on enleva cette charge (7 mars–13 mars), le côté aval se releva de 3mm.

B. 1er Rouleau. — On a suivi le mode de construction du pont de Lavaur[5].

On construisit d'abord les tronçons I et I' sur coffrages *c* ; puis les autres simultanément : II et II' sur coffrages *c'* ; III et III', IV et IV' sur taquets *tt'* (f_1).

f_1
Construction du 1er rouleau
Coupe en long — 3mm



On ménageait, au-dessus de chaque point fixe du cintre, des joints secs, sur bandes de plomb de 30mm de largeur et 18mm d'épaisseur, à 2cm en arrière de l'intrados, et sur cales de chêne à l'extrados.

Les parties des bandeaux correspondant aux joints secs étaient construites immédiatement à mortier : on constata une fissure au droit de l'emplacement de chaque clavage. Ceci justifie bien la division en tronçons.

5. — $\widehat{A}^1$ Fr (< 40m)⁴ — Tome II.

Lorsqu'on eut maçonné jusqu'aux 2/3 du premier vau (32e assise), une fissure de 1 à 2mm s'ouvrit dans les têtes, en face des premières assises posées à sec.

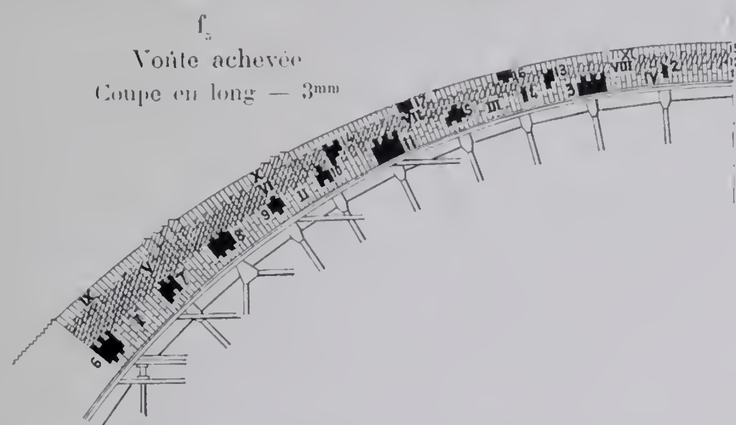
Peu après (35e assise), le cerveau du cintre, sur 25° de chaque côté, se releva de 3mm au sommet amont, de 5mm au sommet aval : le point à 25° de la clef n'a pas bougé.

On le chargea de 100mc de moellons, qui l'abaissèrent de 1mm à la tête amont, de 3mm à la tête aval.

On clava, du 18 avril au 4 mai, à partir de la clef jusqu'à la 5e contrefiche, puis à partir des naissances, au mortier de ciment à 650k à l'état de sable humide [6].

Il ne s'ouvrit pas de fissure pendant le clavage.

f_5
Voûte achevée
Coupe en long — 3mm



C. *Renseignements sur l'exécution de la grande voûte.*

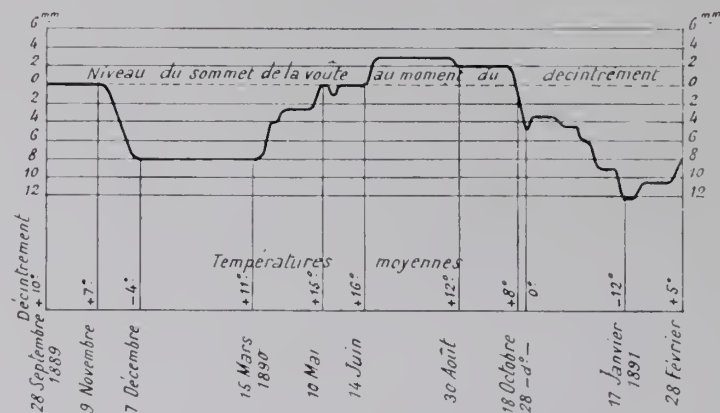
	Fondations (*793mc*)	Assises à pleine épaisseur (*372mc*)	1er Rouleau (*592mc*)	2e Rouleau (*455mc*)	3e Rouleau (*321mc*)	Moyenne et ensemble pr la voûte
Dates du commencement	25 oct. 1888	20 déc. 1888	10 mars 1889	5 mai 1889	28 juin 1889	25 oct. 1888
Dates de la fin	19 déc. 1888	22 fév. 1889	4 mai 1889	5 juin 1889	5 août 1889	5 août 1889
Nombre de tronçons	»	»	8	8	8	24
Nombre de clavages	»	»	21	5	5	31
Durée d'exécution en journées (travail effectif)	44 j	28 j	37 j	28 j	39 j	176 j
Cube de maçonnerie exécutée par jour de travail effectif	18mc 02	13mc 29	16mc 00	16mc 25	8mc 31	14mc 41
Cube de maçonnerie exécutée par journée de 10h de maçon	1mc 48	1mc 08	1mc 04	1mc 03	0mc 82	1mc 06
1mc de maçonnerie de voûte a exigé :						
Heures de maçon	6h 76	12h 12	9h 64	9h 66	12h 26	9h 45
Heures de manœuvres	17h 07	9h 23	16h 32	15h 19	13h 52	16h 42
Poids de ciment	299k	202k	144k	212k	160k	215k
Nombre de maçons employés par jour	12	16	13	15	10	14
Prix de la main-d'œuvre d'un mètre-cube	8f 54	12f 21	10f 31	9f 87	11f 92	10f 16

6. — 9 à 12 litres d'eau pour 50k de ciment.

7. Mouvements de la voûte dus aux variations de température. — Le premier rouleau avait été clavé par une température de 0° à 5°. Avant de claver les 2e et 3e rouleaux (juin et août), on arrosa continuement, pendant 4 jours, les maçonneries, pour les abaisser à + 8°.

Voici les mouvements de la clef observés du 28 septembre 1889 (décintrement au 28 février 1891.

f_6 — Mouvements de la clef

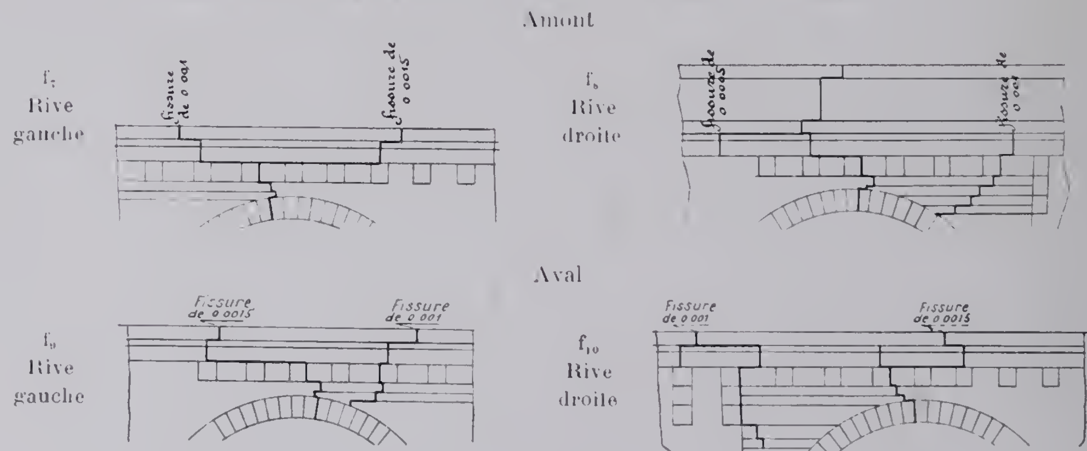


Pour un refroidissement de 20°, la clef baissa de 12mm 7 ; en juin 1891, elle remonta à sa position du décintrement et la dépassa de quelques millimètres en juillet et août (S_3).

La grande voûte ne s'est pas fissurée.

Les tympans et les parapets se sont ouverts, pendant l'hiver 1890-1891, à la clef des voûtes d'évidement voisines des pilastres (f_7 à f_{10}).

Fissures dans les dernières voûtes d'évidement et au-dessus — 8mm



7. — Le développement moyen de l'arc est 83m66, savoir : joints, 14m76 ; granit, 68m90. En admettant pour les coefficients de dilatation : du mortier de ciment, 14×10^{-6} ; du granit, 8×10^{-6}, on trouve, pour un abaissement de 20°, un raccourcissement de : $20° \times 10^{-6}$ [14m76 × 14 + 68m90 × 8] = 0m015157.

En supposant que la courbe déformée soit encore un arc de cercle, l'abaissement correspondant à la clef est 0m0115, au lieu des 0m012 mesurés. (Calcul donné par M. Draux) (S_4).

8. Personnel.

Ingénieurs. — en chef : M. Daigremont ; — ordinaire : M. Draux.
Entrepreneur : M. Justin Prade (S_3).

SOURCES :

S_1. — Annales des Ponts et Chaussées, 1892, 1er semestre, p. 545 à 596, Pl. 5 à 7 : « *Notice sur la construction du Viaduc du Gour-Noir* ». M. Draux, Ingénieur des Ponts et Chaussées.

S_2. — Collection des Dessins distribués aux Élèves de l'École des Ponts et Chaussées, Série 4, section C. Pl. 51. — Légende explicative, tome III, p. 1054 à 1067.

S_3. — Chemin de fer de Limoges à Brive par Uzerche. — Rapport sur l'exécution des travaux, p. 50 à 54. Pl. 12 et 13.

S_4. — Ce que j'ai vu — juin 1908.

Les dessins sont extraits de S_1 et de S_2.

PONT SUR LA VEZÈRE, A POUCH (CORRÈZE)

Ligne de Limoges à Brive, par Uzerche[1]

1890 Â[1] Fr (~ 40m 7)

Φ_1 (S_2)



1. Pourquoi on a fait une grande voûte. — Le tracé est à 44° sur la Vézère : une grande voûte a évité des piles biaises en rivière.

2. Cintre. — Il est imité de celui du pont Antoinette[2].

Comme on ne pouvait creuser le rocher, même à l'aiguille, on nettoya sa surface, et on la régularisa avec du béton de ciment, sur 0m20 à 0m40.

On fixa dessus des lambourdes, sur lesquelles on appuya le pied des pieux.

3. Construction de la voûte. — Elle a été construite du 1er mars au 10 juin 1890, en trois rouleaux.

1. — Entre les stations d'Estivaux et d'Allassac, à 2k730 d'Estivaux.

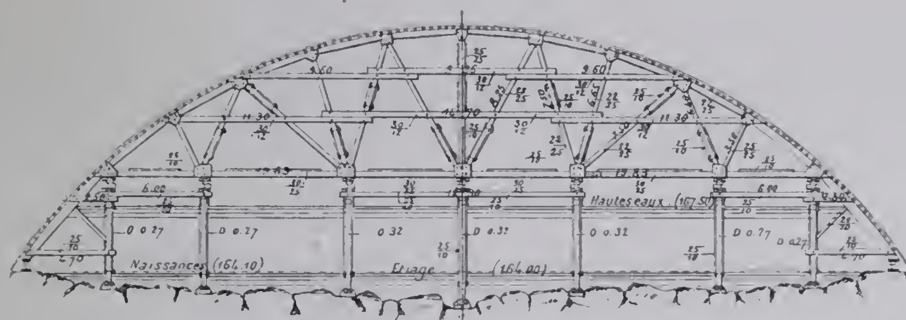
2. — Â[1] Fr (~ 40m 5) — Tome II.

f1 — Élévation — 2mm

f2 Culée 5mm

f3 Couronnement 2cm

f4 — Cintre — 2mm5



4. Personnel.

Ingénieurs. — en chef : M. Daigremont ; — ordinaire : M. Guillaume.

Entrepreneurs : MM. Paviot, Lafeuille et Chaumeil.

SOURCES :

S_1. — Chemin de fer de Limoges à Brive, par Uzerche. — Rapport sur l'exécution des travaux, p. 56 à 59, Pl. 16.

S_2. — Ce que j'ai vu — juin 1908.

PONT SUR LA VÉZÈRE, A FREYSSINET *(CORRÈZE)*

Ligne de Limoges à Brive, par Uzerche[1]

1890-1891 $\widehat{\mathbf{A}}^1$ Fr ($\geqslant$ 40m) 8

Φ_1 (S_2)



1. Pourquoi on a fait une grande voûte. — Le tracé coupe la Vézère sous un angle de 50° : une grande voûte a évité des piles biaises en rivière.

2. Appareil. — Couronnement. — Comme au pont de Pouch[2].

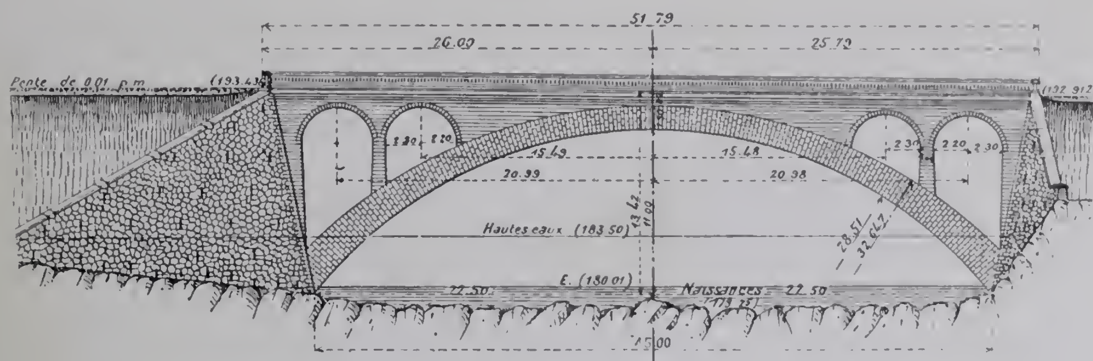
3. Cintre. — On y a réemployé celui du pont de Pouch.

Comme à Pouch, les pieux portent sur des lambourdes fixées sur un lit de béton régularisant la surface du rocher, mise à nu et nettoyée.

1. — Entre les stations d'Estivaux et d'Allassac, à 1k260 d'Estivaux.

2. — $\widehat{\mathbf{A}}^1$ Fr (40m) 7 — Tome III.

f_1 — Élévation — 2^{mm}



4. **Personnel.** — Comme au pont de Pouch[2].

SOURCES :

S_1. — Chemin de fer de Limoges à Brive, par Uzerche, - Rapport sur l'exécution des travaux. p. 56 à 59, Pl. 15.

S_2. — Ce que j'ai vu — juin 1908.

PONT SUR LE PRUTH, A JAREMCZE[1] (*AUTRICHE, - Galicie*)

Ligne de Stanislau (Galicie) — Woronienka — Szigeth (Hongrie)

1893-1894 $\widehat{\mathbf{A}}^1$ F^r (> 40^m) 9

Φ_1 (S_1)



1. Pourquoi on a adopté une grande voûte (S_1). — La ligne traverse en biais la rivière.

On a accepté la portée de 65^m, après les essais sur les voûtes, faits en Autriche en 1890-1891[2].

2. Aspect (S_3). — Cette grande voûte porte sur de courts pieds-droits : sans eux, l'aspect serait meilleur, la voûte moins tendue.

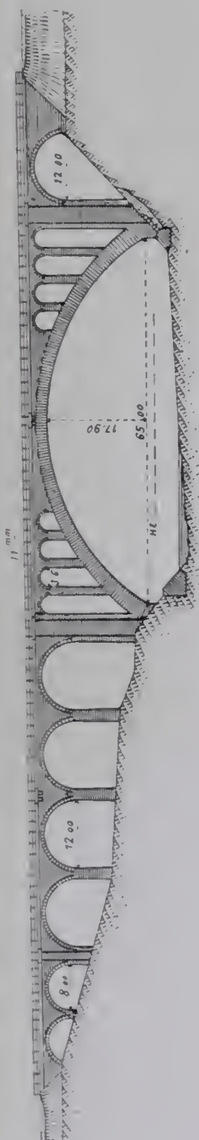
Les dernières piles d'élégissement sont trop hautes.

3. Chape (S_2). — Sur 5 à 9^{cm} de béton, 2^{cm} d'asphalte recouverte, après prise, de sable grossier[3].

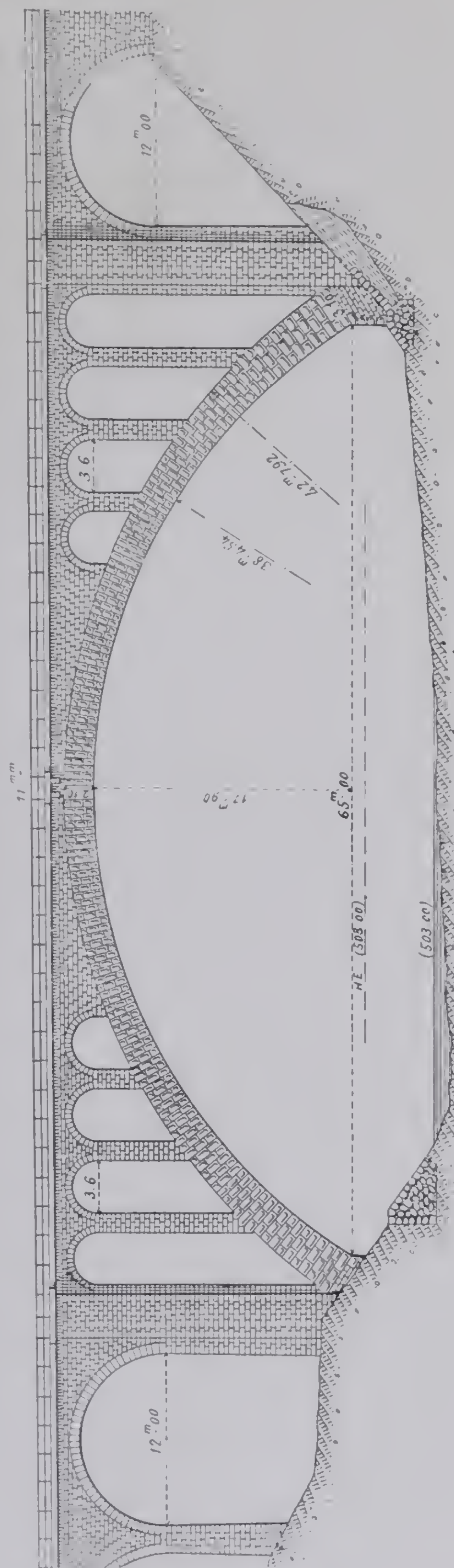
1. — A 650^m au-delà, vers Woronienka, de la station de Jaremcze.

2. — Ils sont exposés plus loin : Tome III, Livre II.

3. — Prix du m. q. : $6^{fl}\,88^{kr} = 14^f45$.



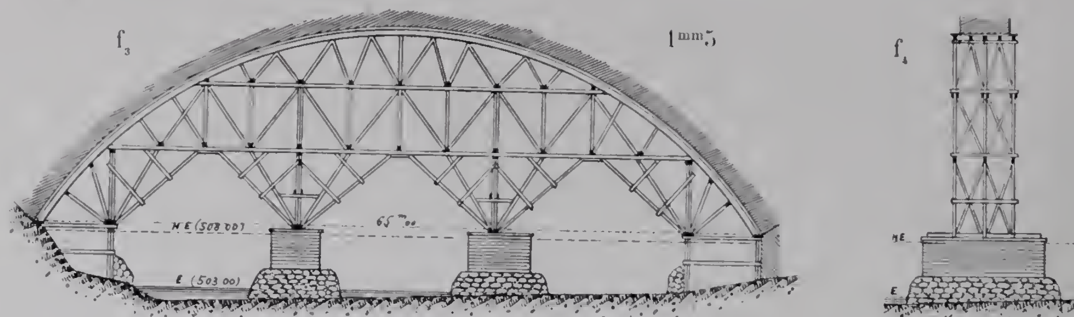
f_1 — Ensemble — 0^mm75 — (S_1)



f_1^1 — Grande voûte — 2^mm [1]

1. — Agrandi d'après S_1. — L'appareil est dessiné d'après mes photographies

4. Cintre (S1).



5. Exécution de la grande voûte.

— A l'exemple des ponts français[5], la grande voûte a été construite en trois rouleaux (S_2).

Au 1er, les voussoirs étaient posés à sec, d'abord en 6 attaques, plus tard en 8, avec joints de 18mm au moins, sur liteaux en bois, matés ensuite en 5 jours 1/2, au mortier humide.

En mars 1894, on posait 6 à 10 assises par jour (S_2).

6. Avantages du matage (S_2).

— « *L'expérience a montré qu'il était* « *très utile de poser à sec et de mater. Le mortier atteint une dureté inouïe; sa* « *liaison à la pierre est aussi intime qu'entre ses molécules elles-mêmes; il n'y a* « *pas d'espace vide, car on peut exercer une surveillance minutieuse en raison de la* « *courte durée de la construction.* »

7. Main-d'œuvre et fournitures pour la grande voûte (S_2).

On y a employé :

	en tout	par m.c. de moellons (1060mc)
Journées de maçons	679 j	0 j 64
Journées de manœuvres	1071 j	1 j 00
Journées de chevaux	52 j	0 j 05
Ciment Portland	55 T 2	52 k 1
Mortier maté	121mc	0mc 114

8. Dates.

Achèvement du cintre (S_2)	décembre 1893
Grande voûte — Commencement	mars 1894 (S_1)
Grande voûte — 1er rouleau — Fin de la pose	8 avril
Grande voûte — 1er rouleau — Clavage (matage des joints)	mi-avril (S_2)
Grande voûte — Clavage du 3e rouleau	10 mai
Achèvement des voûtes d'élégissement et d'accès	fin juillet
Décintrement	2e moitié d'août
Ouverture à la circulation	20 novembre 1894

5. — « *Im Einklange mit französischen Bauausführungen....* » (S_1).

9. Épreuves (S₂). — Aucune déformation sous un train de 3 locomotives, le 11 novembre 1894.

10. Grandes voûtes imitées de celle de Jaremcze. — Les dispositions principales de Jaremcze ont été reproduites à toutes les grandes voûtes sous chemin de fer :

d'Autriche (Ponts de Jamna, Worochta, Krenngraben, Steyrling, Salcano[6], Palmgraben, Schalchgraben, Rothweinbach[7]).

du Grand Duché de Bade (Ponts sur la Gutach, sur le Schwändeholzdobel, de Langenbrand[8]).

Ç'a été un pont type.

11. Personnel.

Ingénieurs :

Projet : M. Huss, Ingénieur en chef de la Direction des Chemins de fer, à Vienne (S_1).

Direction des Travaux : M. Kosinski, Inspecteur à Stanislau (Galicie) (S_3).

Entrepreneur : M. Johann Koller, à Stanislau (S_3).

6. — $\widehat{A}^1$ Fr (⩾ 40m)10, 11, 17, 18, 19 — Tome III.

7. — $\widehat{A}^1$ Fr (⩾ 40m)8, 9, 10 — Tome II.

8. — $\widehat{A}^1$ Fr (⩾ 40m)12, 13, 21 — Tome III.

SOURCES :

Zeitschrift des œsterreichischen Ingenieur - und Architekten Vereins :

S_1. — 20 octobre 1893, p. 545 à 547, Pl. XXIV : « *Mittheilungen über die grossen gewölbten « Brücken der K. K. Staatsbahn Stanislau-Woronienka* », von Ober-Inspector Ludwig Huss, Vorstand des Bureaus für Unterbau und Brücken der K. K. General-Direktion der œsterreichischen Staatsbahnen, — octobre 1893.

(Cet article a été écrit avant la construction de la voûte).

S_2. — 1894, p. 533 à 535 : « *Die Bauvollendung der grossen gewölbten Brücken der K. K. Staatsbahn Stanislau-Woronienka.* » Ludwig Huss.

S_3. — Renseignements qu'a bien voulu me donner, sur place, M. G. Geyer, Directeur du réseau de Galicie, — septembre 1909.

S_4. — Ce que j'ai vu — septembre 1909.

PONT SUR LE PRUTH, A JAMNA[1] *(AUTRICHE, - Galicie)*

Ligne de Stanislau (Galicie) — Woronienka — Szigeth (Hongrie)

1893-1894 $\widehat{\mathbf{A}}^1$ F^r $(\geq 40^m)^{10}$

Φ_1 (S_4)



1. Quelques observations (S_4). — Même appareil, mêmes maçonneries, même chape qu'à Jaremcze[2].

L'appareil du bandeau se continue dans le pilastre.

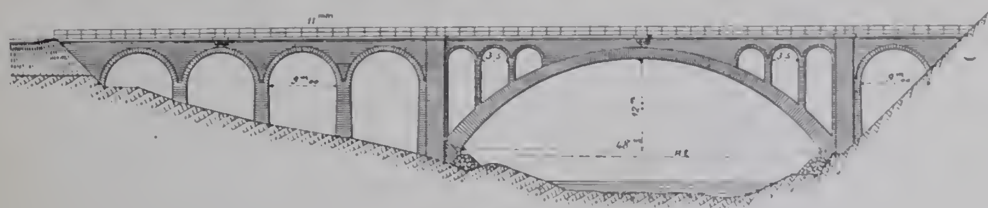
La plinthe paraît maigre.

2. Exécution de la grande voûte. — Même méthode qu'à Jaremcze[2], mais avec 2 rouleaux au lieu de 3.

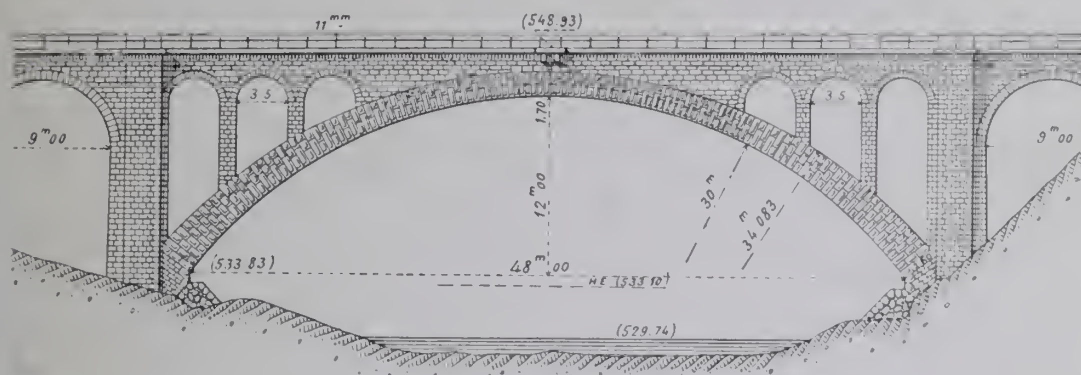
1. — A 1^k096 en deçà, vers Stanislau, de la station de Jamna.

2. — $\widehat{\mathbf{A}}^1$ F^r $(\geq 40^m)^9$ — Tome III. p. 114.

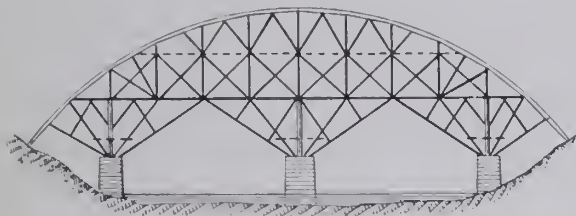
f_1 — Ensemble — 1mm



f_2[3] — Grande voûte — 2mm



f_3[4] — Cintre



3. Dates.

Commencement des travaux	1893
Achèvement du cintre	décembre (S_2)
	1894
Fin de la pose des moellons du premier rouleau	8 avril
Clavage du 2e rouleau	10 mai
Achèvement des voûtes d'élégissement et d'accès	fin juillet
Décintrement	2e moitié d'août
Épreuves (même résultat qu'au Pont de Jaremcze [2])	11 novembre
Ouverture à la circulation	20 novembre

4. Personnel. — Comme au Pont de Jaremcze [2].

3. — Agrandi d'après S_1. — L'appareil est dessiné d'après Φ_1.
4. — Calqué sur une photographie (S_2, p. 534).

SOURCES :

Celles du Pont de Jaremcze $\widehat{\mathbf{A}}^1$ F^r ($\geq$ 40m)9, p. 117.

PONT SUR LE PRUTH, PRÈS DE WOROCHTA [1,2] (AUTRICHE, - *Galicie*)

Ligne de Stanislau (Galicie) — Woronienka — Szigeth (Hongrie)

1893-1894 $\widehat{A}^1$ $F^r_{(\geq 40^m)}{}^{11}$

Φ_1 (S_2)



1. Quelques observations (S_2). — Mêmes dispositions générales qu'à Jaremcze [3] et à Jamna [4].

Les bandeaux ont un léger bossage ; la douelle, à taille plate, a mêmes épaisseurs d'assise.

La plinthe paraît maigre.

Beaucoup de moellons de douelle sont attaqués.

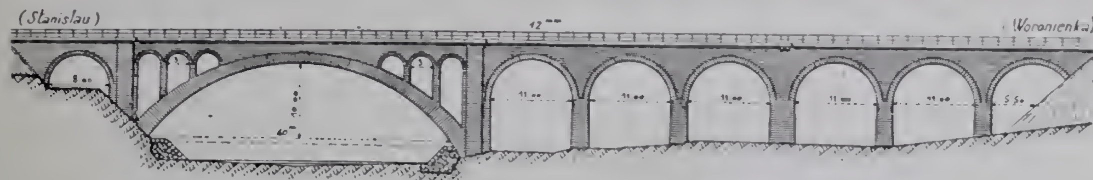
1. — A 523^m en deçà, vers Stanislau, de la station de Worochta.

2. — Il y en a un autre, — voûte en arc peu surbaissé, de 34^{m}60 d'ouverture, avec tympans élégis, entre deux viaducs d'accès (S_1).

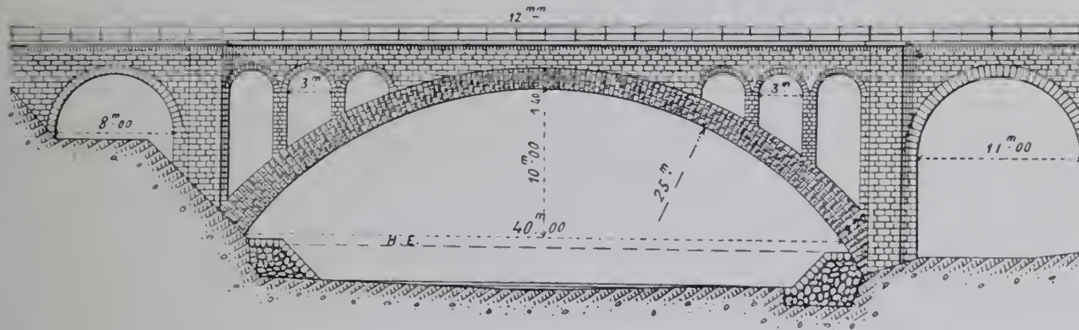
3. — $\widehat{A}^1$ $F^r_{(\geq 40^m)}{}^{9}$, — Tome III.

4. — $\widehat{A}^1$ $F^r_{(\geq 40^m)}{}^{10}$, — Tome III.

f$_1$. — Ensemble — 1mm (S$_1$)



f$_2$[5] — Grande voûte — 2mm



En août 1909, on refaisait la chape : le carton bitumineux employé en 1894 n'avait pas duré.

2. Personnel. — Comme au Pont de Jaremcze[3].

5. — Agrandi d'après S$_1$. — L'appareil est dessiné d'après Φ$_1$.

SOURCES :

S$_1$ du Pont de Jaremcze, $\widehat{\mathbf{A}}^1$ Fr (≥ 40m)9, p. 117.

S$_2$. — Ce que j'ai vu — septembre 1909.

PONT SUR LA GUTACH (*ALLEMAGNE, - Grand Duché de Bade*)

Ligne de Neustadt à Donaueschingen[1]

1899-1900 $\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ F^{r} $(> 40^{m})$ 12

Φ_1 — aval (S_3)



1. Pieds-droits de la grande voûte. — Comme au Pont de Jaremcze[2], dont celui-ci est une réplique, la grande voûte, au lieu de retomber directement sur le sol, porte sur de petits pieds-droits.

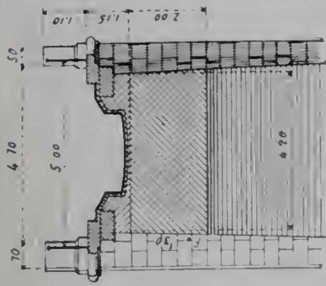
2. Joints de dilatation. — On a ménagé, au-dessus des voûtes d'élégissement voisines des pilastres, des joints verticaux secs *j* (f_2). Ils traversent la plinthe ; ils sont prolongés, dans la voûte d'élégissement, par une feuille de plomb disposée suivant un joint normal à l'intrados.

3. Chape. — L'extrados de la grande voûte a été peint à l'huile.
La chape est en feuilles de « *Tektolith* ».[3]

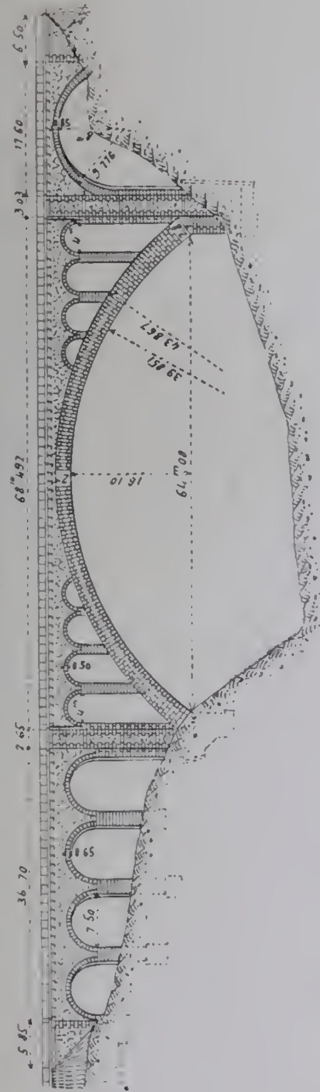
1. — Cette ligne prolonge celle de Fribourg-en-Brisgau à Neustadt, dite « Hœllenthalbahn ».
Le pont est entre les stations de Kappel et de Böthenbach, près de celle de Kappel, à environ 39k de Fribourg.

2. — $\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ F^{r} $(> 40^{m})$ 9 — Tome III.

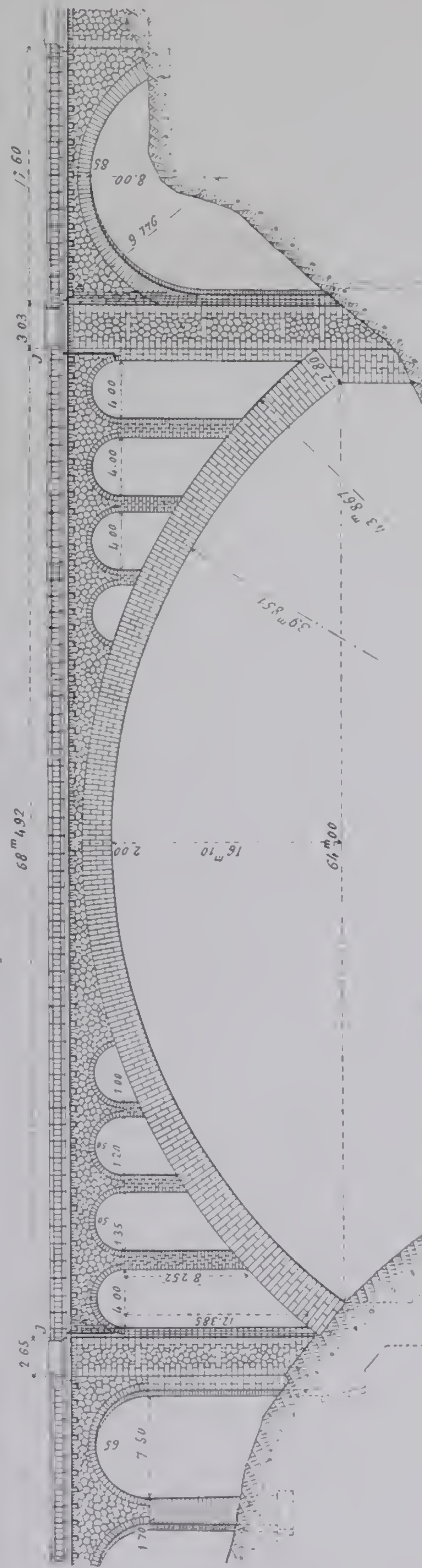
3. — Tissu asphalté.



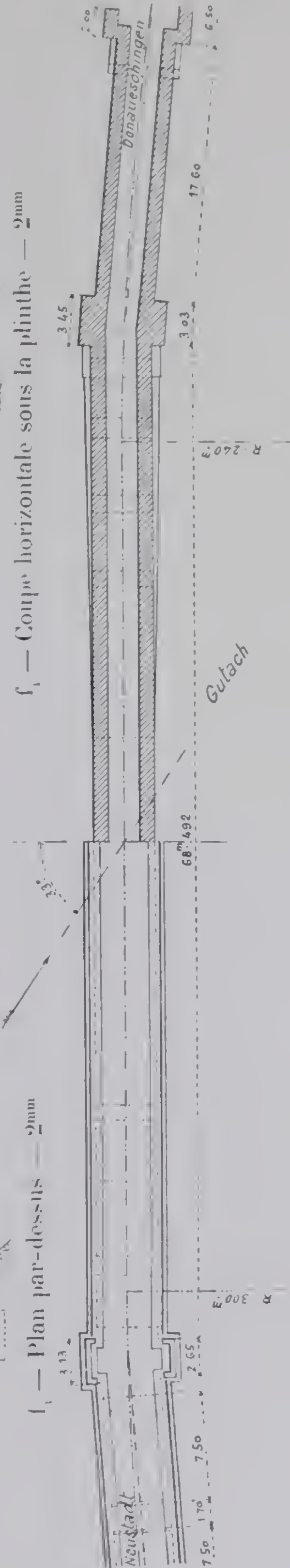
f_5 — Coupe en travers à la clef — 5mm



f_1 — Ensemble — 1mm



f_2 — Grande voûte — 2mm

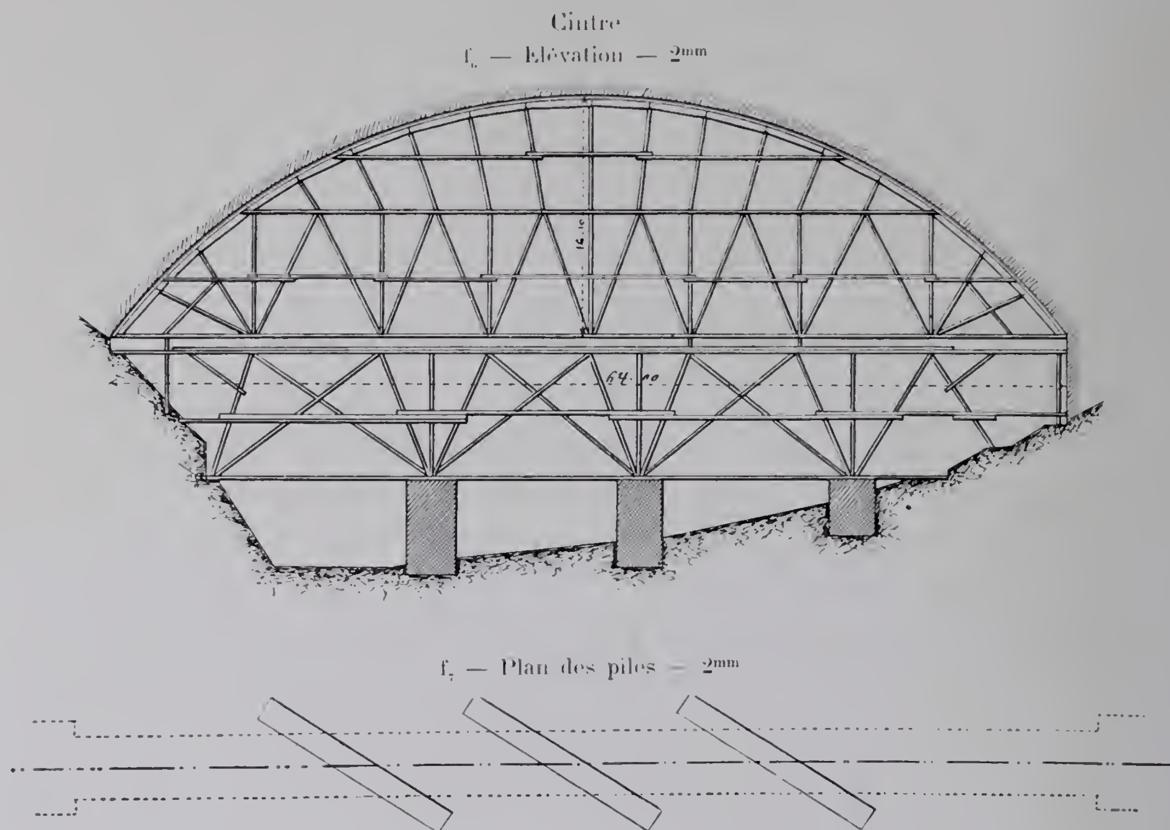


f_4 — Coupe horizontale sous la plinthe — 2mm

f_1 — Plan par-dessus — 2mm

4. Plinthe. — Elle est en encorbellement sur consoles ancrées dans les tympans.

5. Cintre. — Les deux étages supérieurs ont la même disposition qu'au pont de Lavaur[4].



Cintre

f₆ — Élévation — 2mm

f₇ — Plan des piles — 2mm

6. Exécution de la grande voûte. — « *Comme les constructions...* « *françaises.... prises pour modèle* »[5], elle a été faite en deux rouleaux.

Le premier a été construit du 24 septembre au 3 octobre 1899, en 6 attaques. On a posé à sec tous les voussoirs sur liteaux de 15mm à 22mm.

Ses moellons courts avaient la moitié de l'épaisseur totale de la voûte, soit 1m à la clef et 1m40 aux retombées ; ses longs dépassaient de 30cm.

Les joints secs ont été matés au mortier de ciment, du 3 au 6 octobre 1899.

Le deuxième rouleau a été construit du 3 au 13 mai 1900 : on matait tous les joints sur la hauteur de ses moellons courts.

4. — $\widehat{A}^1$ Fr (> 40m)[4] — Tome II.

5. — « *Im Einklang mit den œsterreichischen oder vielmehr den französischen Bauausführungen die* « *hierfür vorbildlich waren....* » (S_2, p. 272).

7. Tassements moyens à la clef, comptés à partir du 24 septembre 1899, commencement de la construction du premier rouleau.

	Dates	Tassements en *mm*	Par rapport au 11 juin 1900	Température de l'air en degrés Celsius
	1899			
Tassement du cintre	3 octobre (avant le clavage du 1er rouleau) . .	53		»
	1900			
	1er mai (avant la construction du 2e rouleau).	79		»
	14 mai (après la construction du 2e rouleau).	85		»
	9 juin	89		+ 12°
Tassement de la voûte	11 juin	110	—	+ 12°
	22 août	129	19	+ 19°
	30 novembre	141	31	+ 1°
	1901			
	14 février	168	58	— 12°
	10 juillet	150	40	+ 22°

Sans surcharge, la voûte porte 11 tonnes par mètre courant.

A aucun moment, on n'y a observé de fissure.

SOURCES :

S_1. — « Die Fortsetzung der Höllenthalbahn von Neustadt über Löffingen nach Hüfin-« gen », - Karlsruhe, Chr. Fr. Müllers'che Hofbuchdruckerei, 1901, p. 25 à 28, Pl. hors-texte : « *Gutachbrücke* ».

S_2. — La Schweizerische Bauzeitung du 21 décembre 1901 donne, p. 271 à 275, un article de M. R. Moser, Ingénieur en chef : « *Grosse Steinbrücken im Grossherzogtum Baden* » dont les renseignements sont extraits de S_1.

S_3. — Ce que j'ai vu — août 1908.

PONT SUR LE SCHWANDEHOLZDOBEL

(ALLEMAGNE, — Grand-Duché de Bade)

Ligne de Neustadt à Donaueschingen [1]

1899-1900 $\widehat{A}^1$ Fr ($>$ 40m)[13]

Φ₁ (S₁)



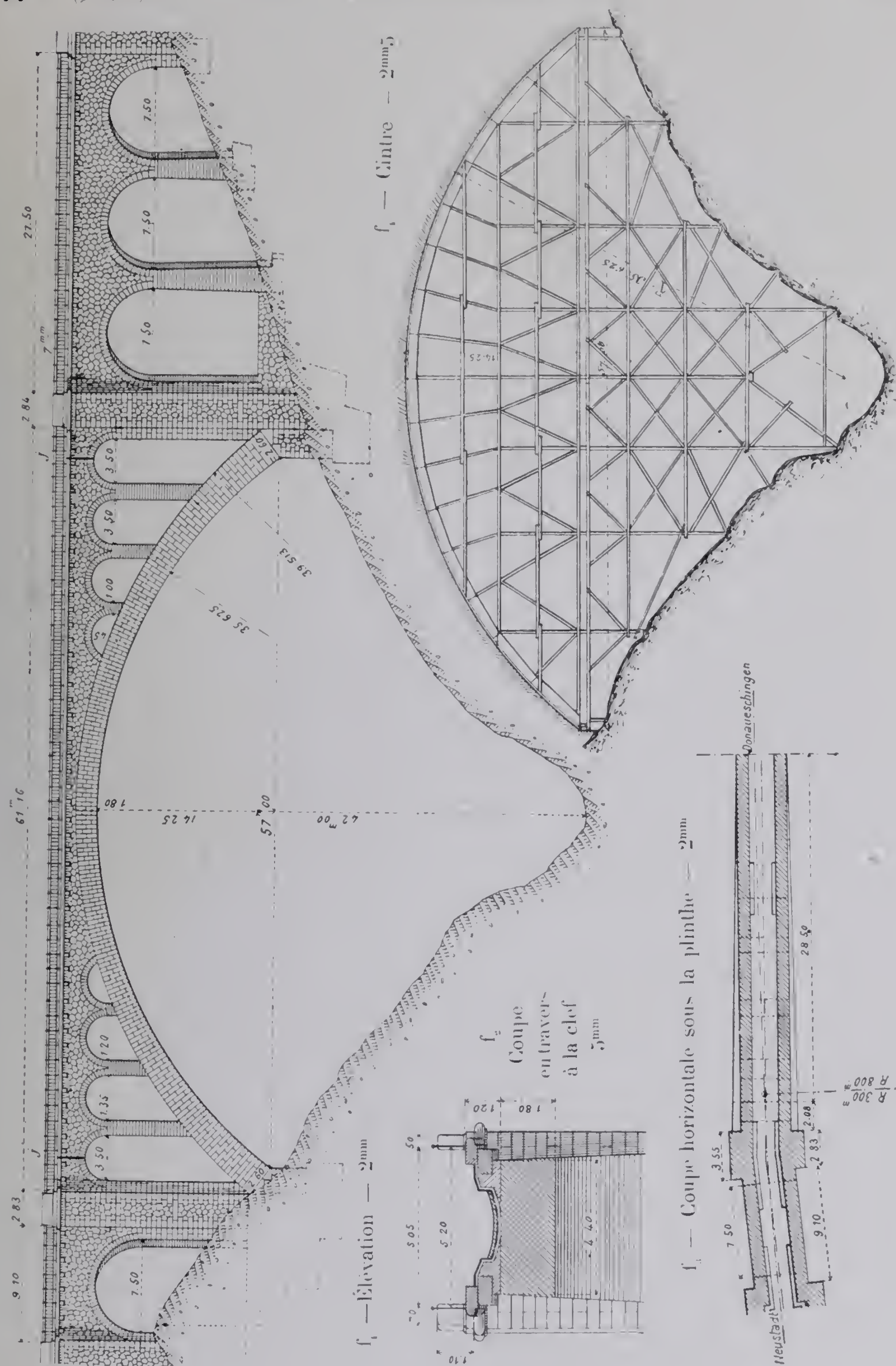
1. Pieds-droits de la grande voûte. — Comme au Pont sur la Gutach [2], construit en même temps, réplique comme lui du Pont de Jaremeze [3], la grande voûte, au lieu de retomber sur le sol, porte sur de petits pieds-droits.

2. Joints de dilatation. — On a laissé vide un joint vertical j (f_1), depuis la clef de la voûte d'évidement voisine du pilastre, jusqu'à la plinthe.

3. Plinthe. — Elle est en encorbellement sur consoles ancrées dans les tympans.

1. — Le pont est entre les stations de Kappel et de Rothenbach, à 1k5 environ du pont sur la Gutach $\widehat{A}^1$ Fr ($>$ 40m)[12].

2. — $\widehat{A}^1$ Fr ($>$ 40m)[12] - Tome III. 3. — $\widehat{A}^1$ Fr ($>$ 40m)[9] - Tome III.


f1 — Élévation — 2mm
f2 Coupe en travers à la clef 5mm
f3 — Cintre — 2mm5
f4 — Coupe horizontale sous la plinthe — 2mm
Donaueschingen
Neustadt

4. Cintre (f_1). — Les deux étages supérieurs ont la même disposition qu'au pont de Lavaur [4].

5. Exécution de la grande voûte. — Même mode de construction qu'au pont sur la Gutach [5] : deux rouleaux avec découpe de 0m30.

6. Dates.

1er rouleau	Construction	23-30 avril 1900
	Clavages	30 avril - 2 mai 1900
2e rouleau		23 mai - 1er juin 1900

7. Tassements moyens à la clef, comptés à partir du 25 avril 1900, pendant la construction du premier rouleau.

	Dates	Tassements en *mm*		Température de l'air en degrés Celsius
	1900			
Tassement du cintre	6 mai (après clavage du 1er rouleau)	66		»
	21 mai (avant construction du 2e rouleau)	79		»
	1er juin (après construction du 2e rouleau)	87		+ 15°
	13 juillet (avant décintrement)	99		+ 20°
			Par rapport au 13 juillet 1900	
Tassement de la voûte	13 juillet (après décintrement)	120		+ 20°
	3 novembre	172	52	+ 10°
	1901			
	14 février	200	80	— 17°
	10 juillet	183	63	+ 25°

On n'a pas constaté de fissure dans la voûte.

4. — $\widehat{A}^1$ Fr ($\geqslant$ 40m)^4 - Tome II. 5. — $\widehat{A}^1$ Fr ($\geqslant$ 40m)^{12} - Tome III.

SOURCES :

S₁. — « Die Fortsetzung der Höllenthalbahn von Neustadt über Löffingen nach Hüfingen », Karlsruhe, Chr. Fr. Müllers'che Hofbuchdruckerei, 1901, p. 28 à 30, Pl. hors-texte : « *Die « Schwändeholzdobelbrücke* ».

S₂. — La Schweizerische Bauzeitung du 21 décembre 1901 donne, pages 271 à 275, un article de M. R. Moser, Ingénieur en chef : « *Grosse Steinbrücken im Grossherzogtum Baden* », dont les renseignements sont extraits de S₁.

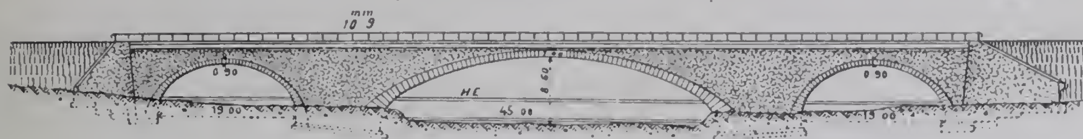
S₃. — Ce que j'ai vu — août 1908.

PONT SUR LA CHEMNITZ (SAXE)

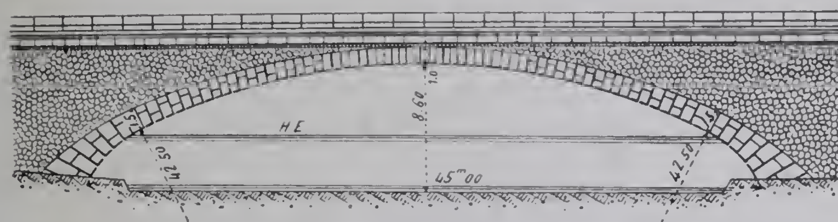
Ligne[1] de Chemnitz à Wechselburg[2]

1901-1902 $\widehat{A}^1$ F^r ($\geqslant$ 40^m) 14

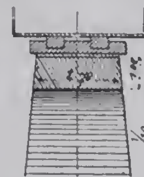
f_1 — Ensemble — 1^{mm} (S'_1)



f_2 — Grande voûte[3] — 2^{mm} (S'_1)



f_3 — Coupe en travers à la clef — 4^{mm} (S'_1)



Φ_1 (S''_1)



1. Dispositions à signaler.

— L'ouvrage traverse en biais la Chemnitz (S''_1).

Il n'a que 2^{m}70 de largeur en haut.

Le parapet et les trottoirs sont en encorbellement. On a simulé des bandeaux avec un crépi jouant le granit ; la douelle est barbouillée de mortier (S''_1).

2. Personnel.

Exécution : MM. Liebold et Cie, de Langebrück (Saxe).

1. — d'intérêt local à voie normale.

2. — au point 21^{k}647 de la ligne.

3. — La portée est 46^m d'après S''_1.

SOURCES :

S_1. — Dessins (S'_1) et album (S''_1) qu'a bien voulu me remettre M. Liebold, en 1908.

PONT SUR LE TORRENT DIVERIA *(ITALIE, - Province de l'Ossola)*

Ligne de Domodossola à Iselle [1] (Descente du Simplon à Milan)

1902 $\widehat{\mathbf{A}}^1$ F^r ($\geqslant$ 40^m) 15

Φ_1 (S_2)



1. Quelques observations. — Le pont traverse en biais le torrent : on l'y entonne par de longs guideaux.

Les guideaux, tympans, piédroits, plinthes, pilastres, sont en granit ; la voûte est en briques.

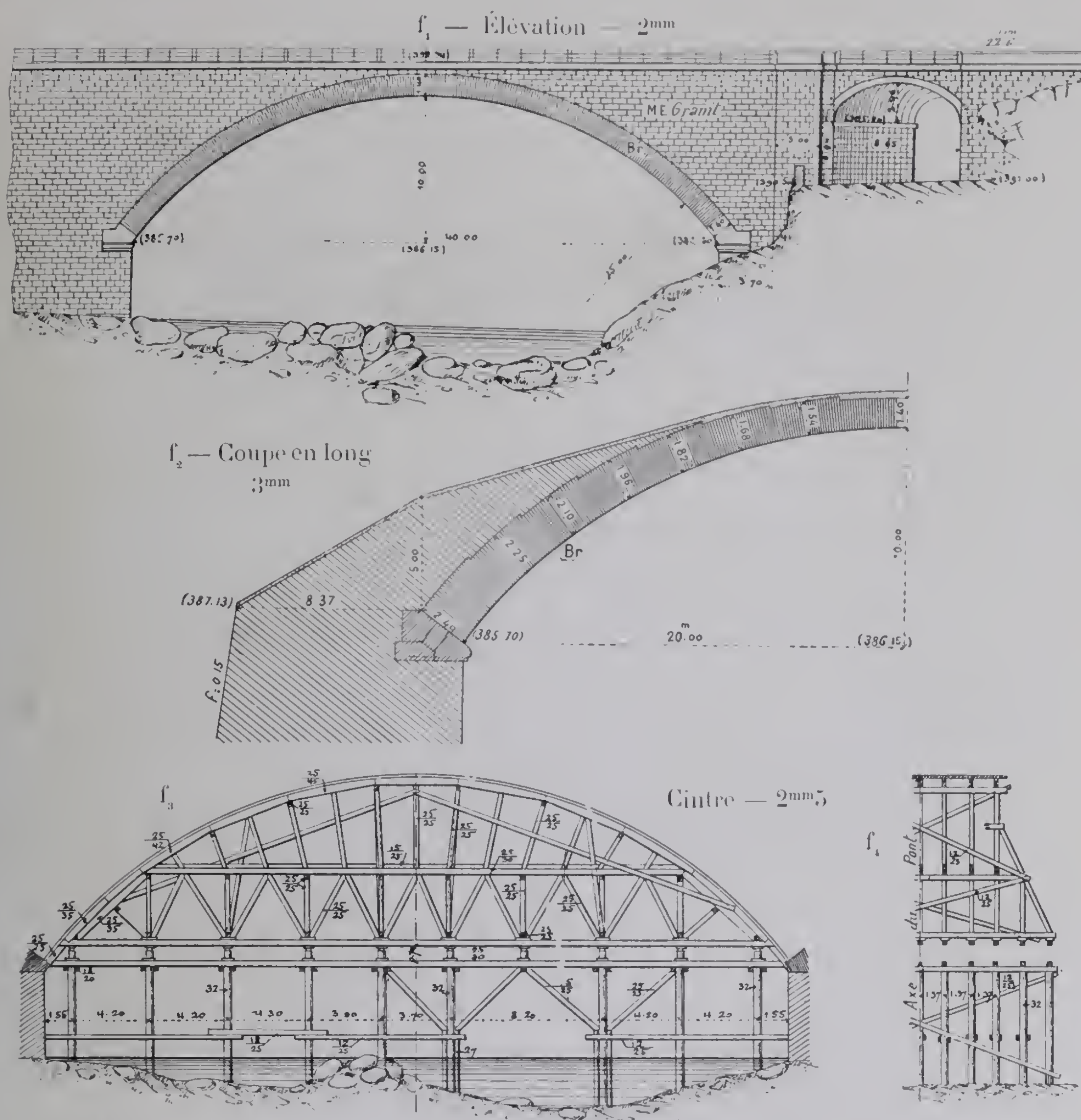
La plinthe paraît maigre.

2. Cintre.

Pieux	117^{mc}
Fermes	150
Brise-lame	7
Contreventement transversal	39
Platelage	42
En tout	355^{mc}

3. Dates. — La voûte fut commencée dans les premiers jours de mai 1902, terminée vers le milieu de juillet.

1. — au P^t. 6^k911^m de cette ligne, entre les stations de Varzo et Preglia, à 3^k1 environ en amont de Preglia.



4. Personnel[2].

Projet : M. Guiseppe Oliva, alors Directeur du Service de la Construction et de l'Entretien de la Société des Chemins de fer de la Méditerranée ; depuis, Directeur Général de cette Société.

Exécution en régie.

2. — Indication gracieusement donnée par M. Edouard Garneri, Chef du Service de l'Entretien des Chemins de fer de l'Etat, à Bologne.

SOURCES :

S_1. — Societa Italiana per le Strade Ferrate del Mediterraneo. — Servicio delle Costruzioni : « *Relazione sugli Studi e Lavori eseguiti dal 1897 a 1905* », - texte : chapitre II, pages 99 et 100 ; — dessins : tav. XVII, - Rome 1906.

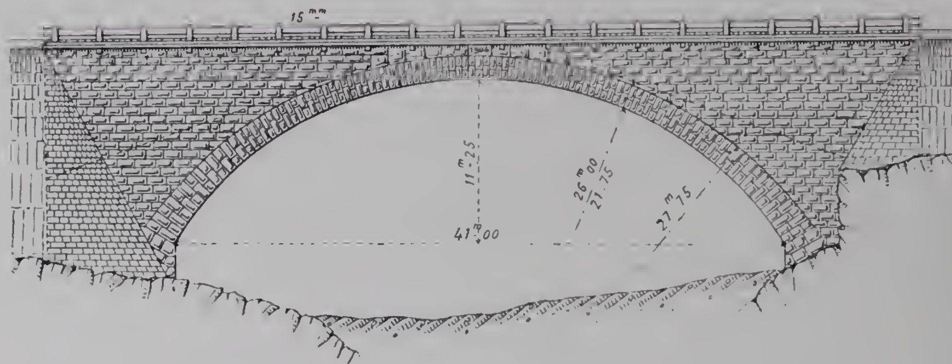
S_2. — Ce que j'ai vu — juillet 1908.

PONT SUR LE **STRANDEELVEN,** PRÈS DE VOSS (*NORVÈGE*)

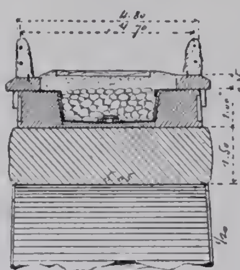
Chemin de fer de Christiania à Bergen

1902-1904 — $\widehat{A}^{1}$ F^{r} (= 40^{m}) 16

f_1 — Élévation — 2^{mm}



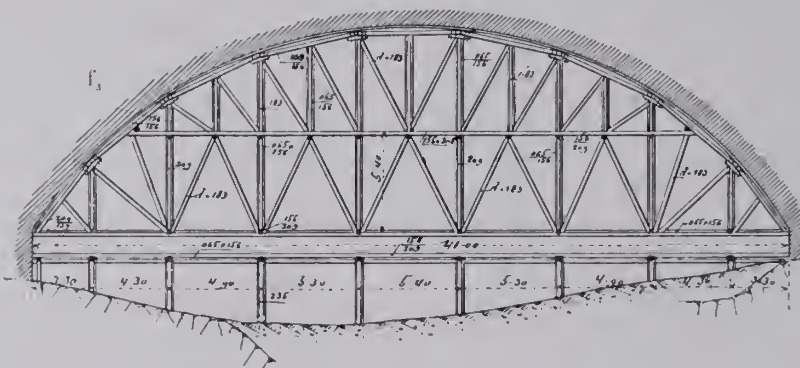
f_2 — Coupe en travers à la clef — 5^{mm}

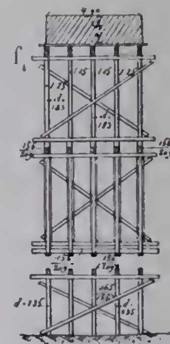


1. Dates.

Commencement des travaux.....	automne 1902
Construction de la voûte.........	6 août — 22 septembre 1903
Décintrement....................	14 septembre 1904
Ouverture à la circulation........	octobre 1904

Cintre — $2^{mm}5$





2. Personnel.

Projet : Service de la Construction des Chemins de fer de l'État norvégien.

Direction des Travaux : L'Ingénieur en Chef du Chemin de fer de Bergen (partie ouest).

Φ$_1$ (S$_1$)



SOURCE :

S$_1$. — Dessins d'exécution, renseignements et photographies qu'a bien voulu me communiquer la Direction des Chemins de fer norvégiens, sur la gracieuse intervention de M. E. A. H. Sinding, Directeur de l'École Polytechnique de Christiania, — mai 1911.

PONT SUR LE KRENNGRABEN PRÈS DE DIRNBACH[1] *(Haute-AUTRICHE)*

Ligne de Klaus-Steyrling à Selzthal (Pyhrnbahn)

1904-1905 $\widehat{\mathbf{A}}^1$ $F^r{}_{(>40^m)}17$

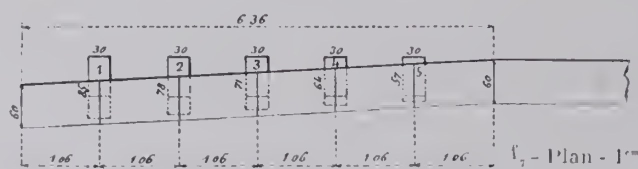
Φ_1 (S_1)

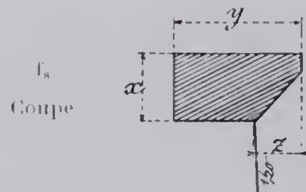


1. Dispositions en vue de la courbe[2] du tracé. — Les têtes sont planes.

A la tête du côté du centre, la plinthe est en ligne brisée. Les côtés extrêmes sont posés sur 5 corbeaux (Φ_1, f_1, f_7, f_8), dont voici les dimensions :

Corbeaux

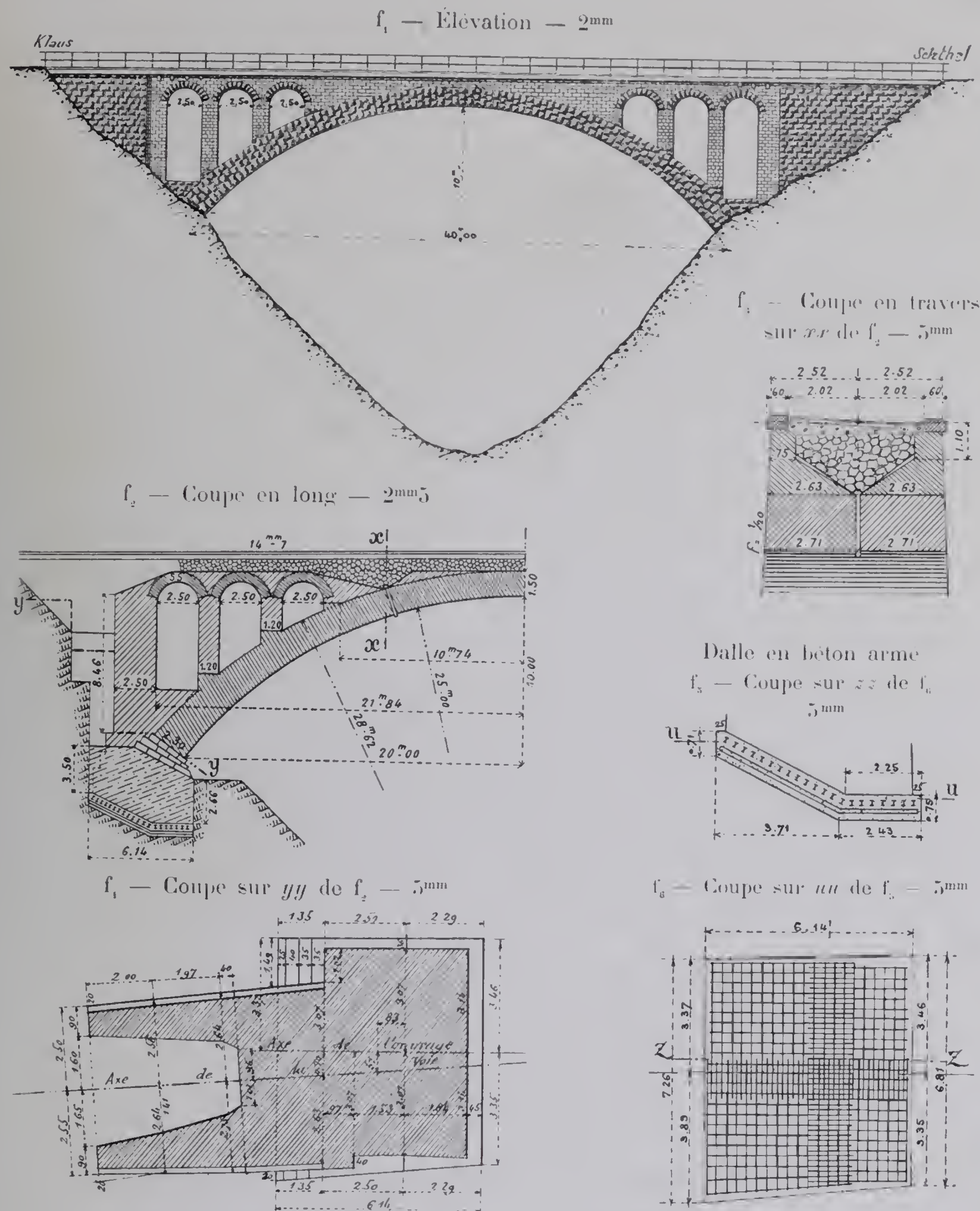




Nos	x	y	z
1	45c	85c	31c
2	40	78	24
3	35	71	18
4	30	64	11
5	25	57	4

1. — entre la station de Dirnbach et la halte de St. Pankraz.

2. — Sur S'_1, le rayon n'est pas coté. — D'après les ordonnées de la courbe, il est d'environ 320m.



f_1 — Élévation — 2mm

f_3 — Coupe en travers sur xx de f_2 — 5mm

f_2 — Coupe en long — 2mm5

Dalle en béton armé
f_5 — Coupe sur zz de f_6 — 5mm

f_4 — Coupe sur yy de f_2 — 5mm

f_6 — Coupe sur uu de f_5 — 5mm

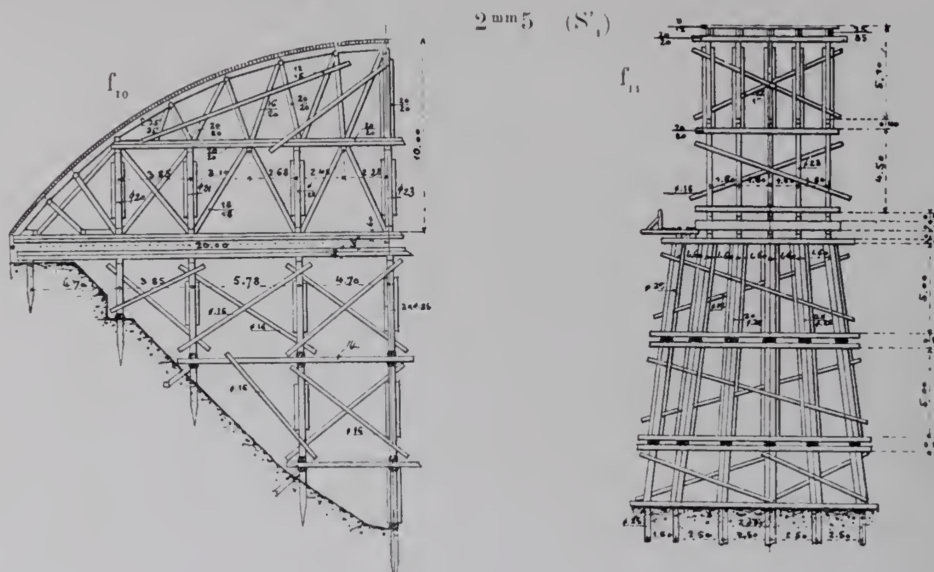
2. Viaduc d'évidement. — Les bandeaux et la douelle sont en calcaire ; les piles et tympans, en béton moulé (S_1).

Les crossettes d'appui des piles, en granit, dépassent l'extrados de la grande voûte : elle n'est pas entamée.

3. Aspect. — Il y a trop de tympan au-dessus de la clef.

Les piles d'élégissement sont trop épaisses (1m20 pour une portée de 2m50).

4. Cintre. — On a inauguré là le mode de décintrement inventé par M. l'Ingénieur en chef Zuffer [3].



Il n'a fallu que deux traits de scie pour détacher le cintre (S_3).

5. Dates.

Fondations	1904
Grande voûte	1905
Ouverture à la circulation	novembre 1905

6. Personnel (S''_1).

Ingénieurs : *Projet et Direction des Travaux :* Service de la Construction des Chemins de fer de l'Etat.

Direction générale à Vienne : M. J. Zuffer, Directeur du Service.

Direction locale à Windischgarsten.

Entrepreneurs : MM. E. Prost et Cie, à Vienne.

3. — décrit dans la monographie du Pont sur le Palmgraben $\widehat{A}^1$ Fr ($\geqslant 40^m$)^8 — Tome II.

SOURCES :

S_1. — Dessins (S'_1) et renseignements (S''_1) que m'a gracieusement communiqués le Ministère des Chemins de fer, à Vienne, sur la demande qu'en a bien voulu faire l'Ambassadeur de France à Vienne, M. Philippe Crozier.

S_2. — Geschichte der Eisenbahnen der œsterreichisch-ungarischen Monarchie, VI Band, 1898-1908, II Band. « *Der Brückenbau der neuen Alpenbahnen. — A. Steinbrücken* ». Josef Zuffer, p. 74 à 87.

S_3. — Zeitschrift des œsterreichischen Ingenieur-und Architekten Vereines, 1908, p. 174 à 176 : « *Die Ausrüstung der grossen Wölbbrücken im Zuge der neuen Alpenbahnen* », J. Zuffer, K. K. Ober-Baurat.

S_4. — Ce que j'ai vu — août 1909.

PONT SUR LA STEYRLING *(Haute-AUTRICHE)*

Ligne de Klaus-Steyrling à Selzthal[1] *(Pyhrnbahn)*

1904-1905 $\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ $F^{r}{}_{(\geqslant 40^{m})}{}^{18}$

ϕ_1 — amont (S_1)



1. Tympans. — Les voûtes d'évidement sont, comme leurs piles, en béton moulé.

Ces piles sont trop épaisses : pour 3m25 de portée, 1m45, 1m40, 1m35, 1m25.

Il y a trop de plein au-dessus des petites voûtes.

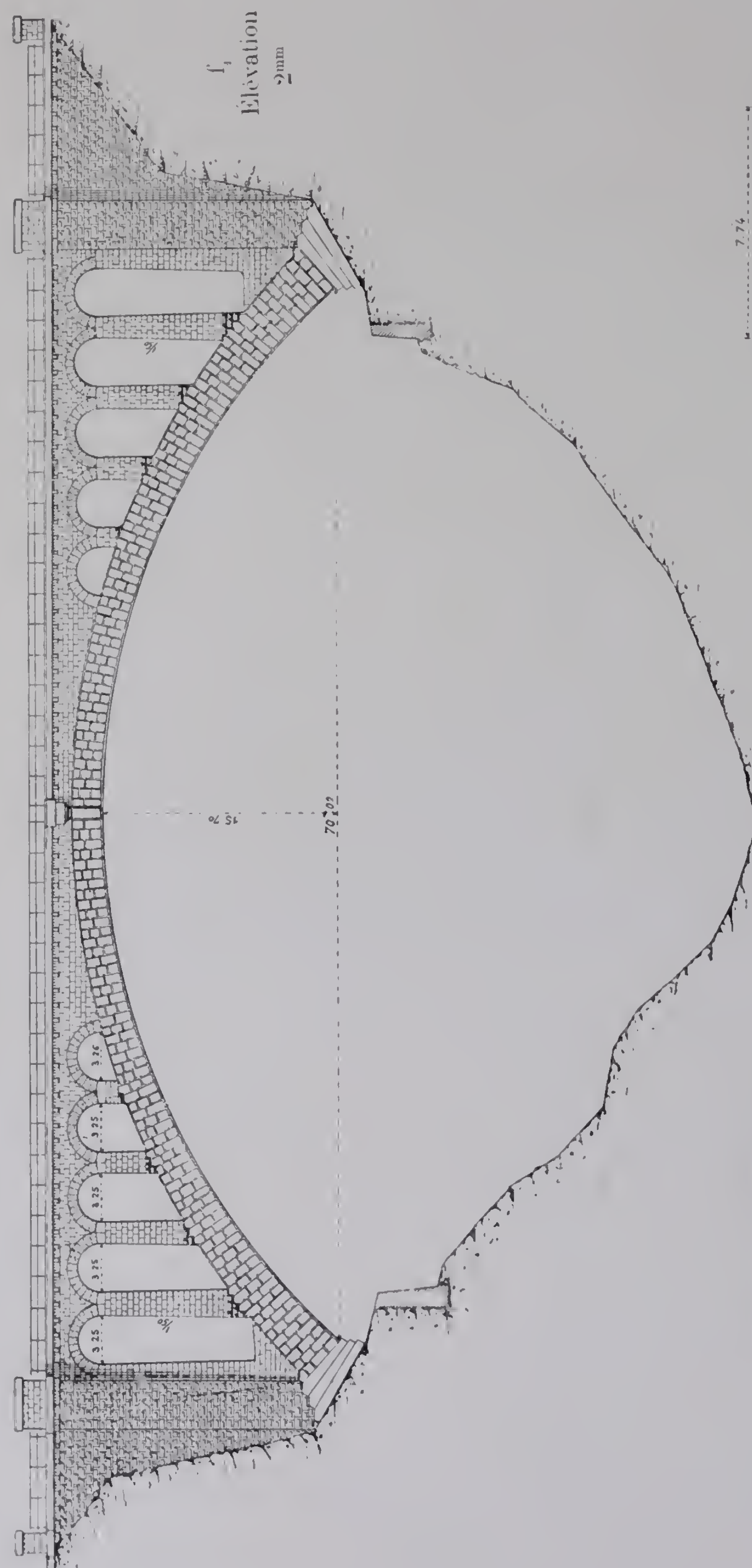
Les corbeaux sous la plinthe ne saillent pas assez.

2. Cartouche de clef (S_1). — Le refuge au-dessus de la clef porte, sur granit poli, cette inscription :

Steyrling
Brücke
erbaut
1905

On aurait pu la mieux placer.

1. — Entre les stations de Klaus et Steyrling, tout près de la station de Steyrling.



f1 Élévation 2mm

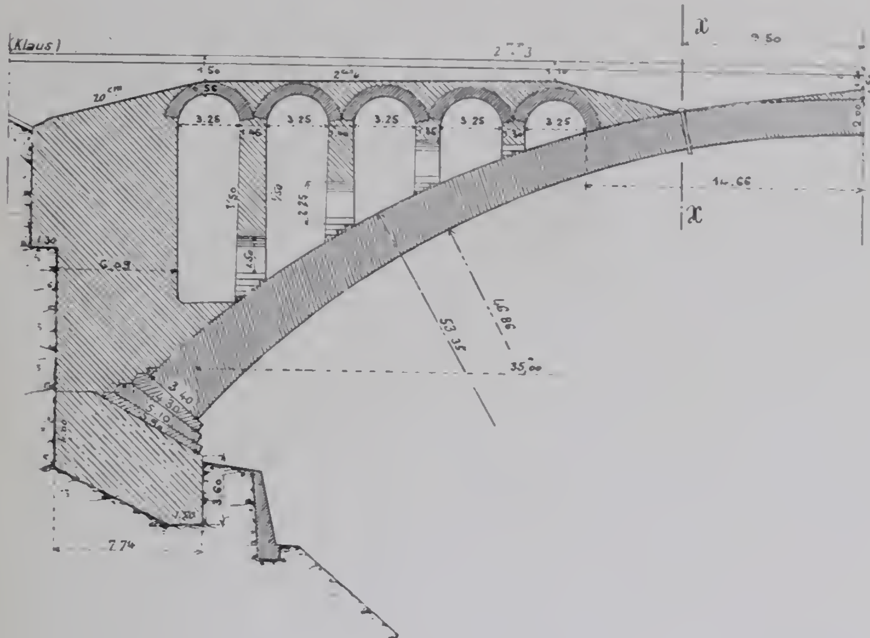
f1 Coupe horizontale de la culée Klaus 4mm

(Selzthal)

(Klaus)

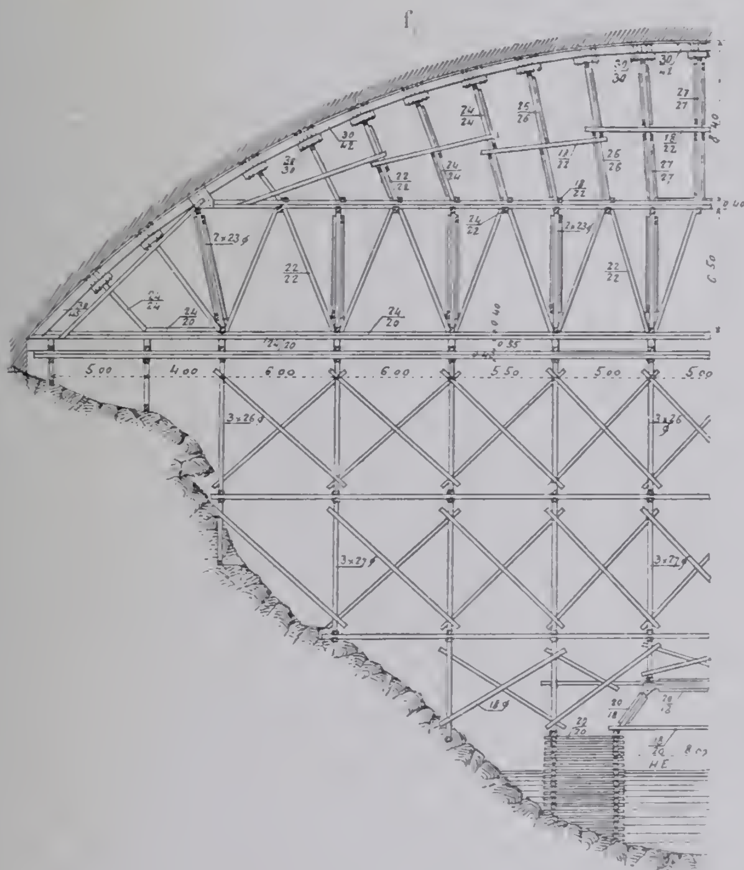
f1 Coupe en travers sur xx de f1 5mm

f₂ — Coupe en long — 2mm5

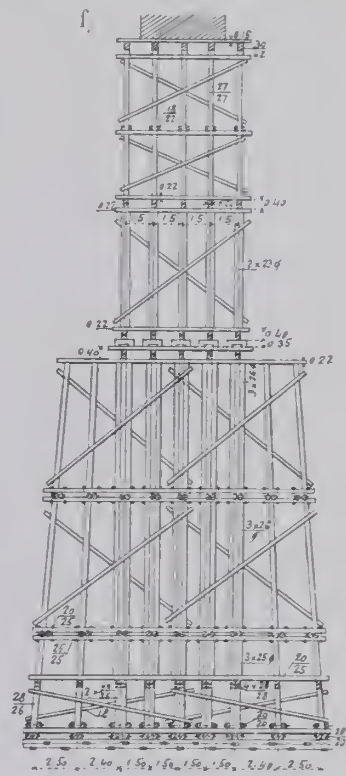


Cintre — 2mm5 (S.)

f₁



f₃



Φ₂ (S₄)



3. Dates.

Commencement des travaux	été 1904
Grande voûte	automne 1904 — printemps 1905
Ouverture à la circulation	19 novembre 1905

4. Personnel (S''_1).

Projet et Direction des Travaux : Comme au Pont sur le Krenngraben [2].

Entrepreneur : MM. E. Gross et Cie.

2. — $\widehat{A}^1$ Fr (⩾ 40m)[17]. - Tome III.

SOURCES :

S_1, S_2, du Pont sur le Krenngraben $\widehat{A}^1$ Fr (⩾ 40m)[17].

S_3. — Dessins du cintre, gracieusement communiqués par M. H. Studer, Ingénieur des chemins de fer rhétiques, à Zuoz (Engadine). — novembre 1912.

S_4. — Ce que j'ai vu — août 1909.

PONT SUR L'ISONZO, PRÈS DE SALCANO [1] (*AUTRICHE*, — *Kustenland*)

Ligne d'Assling (Carinthie) à Trieste, par Goritz [2] — *Wocheinerbahn*

1904–1906 $\widehat{A}^1$ F^r (... 40m) 19

Φ_1 (S'_4)



1. Pourquoi on a fait un pont en maçonnerie (S_0). — Un pont métallique était cher à monter, difficile à remplacer.

2. Pourquoi on a fait une voûte de 85^m. — On avait d'abord projeté une voûte de 80^m. En 1904, on en commença les fouilles. Mais sous le conglomérat dur de la surface, on trouva : à gauche, du sable, — à droite, un éboulis argileux [3].

Après avoir reconnu le sol par des puits et une galerie de sondage, on déplaça la culée gauche (Goritz) de 14^m en amont sur le conglomérat, et on conserva la culée rive droite.

L'ouverture de la voûte fut ainsi portée à 85^m (S_1).

3. Aspect (S_1). — L'ouvrage est bien et simplement traité.

Le corps central est en calcaire blanc : les viaducs d'accès sont en calcaire gris-bleuâtre, à parements moins soignés.

1. — Près de Goritz, entre le « Staatsbahnhof » de Goritz et la station de Plava.

2. — En allemand : *Görz*.   3. — « *Lehmiges Bergschuttmaterial* ».

Goritz

R.G.

Podbrdo

R.D.

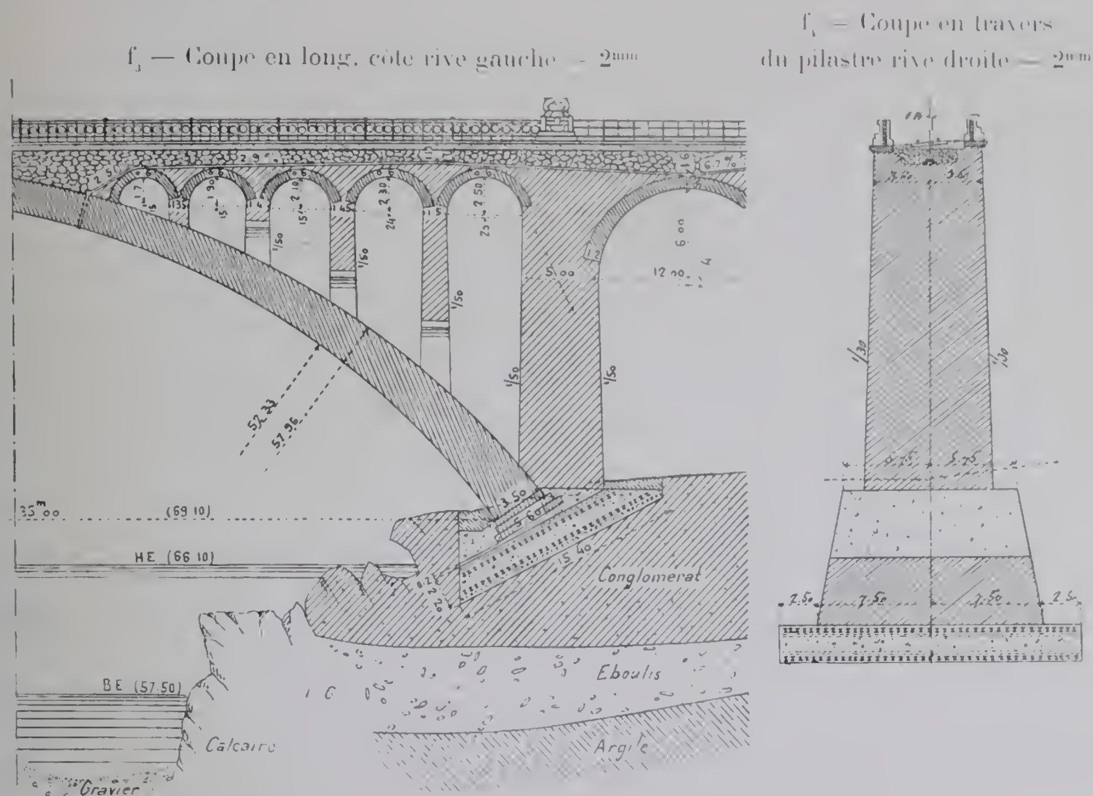
f_2 — Ensemble, aval — 1mm

f_3 — Grande voûte — 2mm

Les pilastres qui encadrent la grande voûte sont secs, maigres, assez pauvrement couronnés.

f_3 — Coupe en long. côte rive gauche — 2mm

f_4 — Coupe en travers du pilastre rive droite — 2mm



La plinthe de la grande voûte pourtourne les pilastres, au lieu de s'y arrêter. Son garde-corps, bien que plus étoffé, se voit à peine.

Le viaduc de rive gauche a, entre les voûtes de 10m et 12m, une pile plus épaisse que les autres, sans contrefort ou saillie qui la distingue des voisines.

4. Chape (S_2). — La même qu'au Pont sur le Palmgraben [1].

5. Joints de dilatation (S_3). — Les deux dernières voûtes d'évidement retombent sur une couche d'amiante de 9mm entre deux voussoirs à surface polie ; le tympan au-dessus est coupé par un joint vertical de feutre asphalté, caché aux têtes par du mortier, lequel s'est fissuré.

Au-dessus, la chape est recourbée : elle peut ainsi s'étendre sans se fendre.

A la fin de 1909, on n'avait pas observé de fissures dans les tympans.

6. Matériaux. — *A. Grande voûte* (S_1). — Elle est tout entière en pierre de taille de calcaire de Nabresina (résistant à 1200k en cubes de 6cm), à mortier de ciment à 1v 3v.

1. — Â¹ Fr (⩾ 40m) 8. — Tome II.

Les efforts maxima sont :

Clef	28^k
Naissances	40^k
Joints de rupture	51^k

soit, par rapport à la résistance en cubes de 6^{m}, un coefficient de sécurité de 23 [5].

B. Autres parties de l'ouvrage (S_1). — Sauf dans la grande voûte et les gradins des appuis, les maçonneries sont à mortier de ciment à 1/5, et moellons ordinaires, assisés en parement.

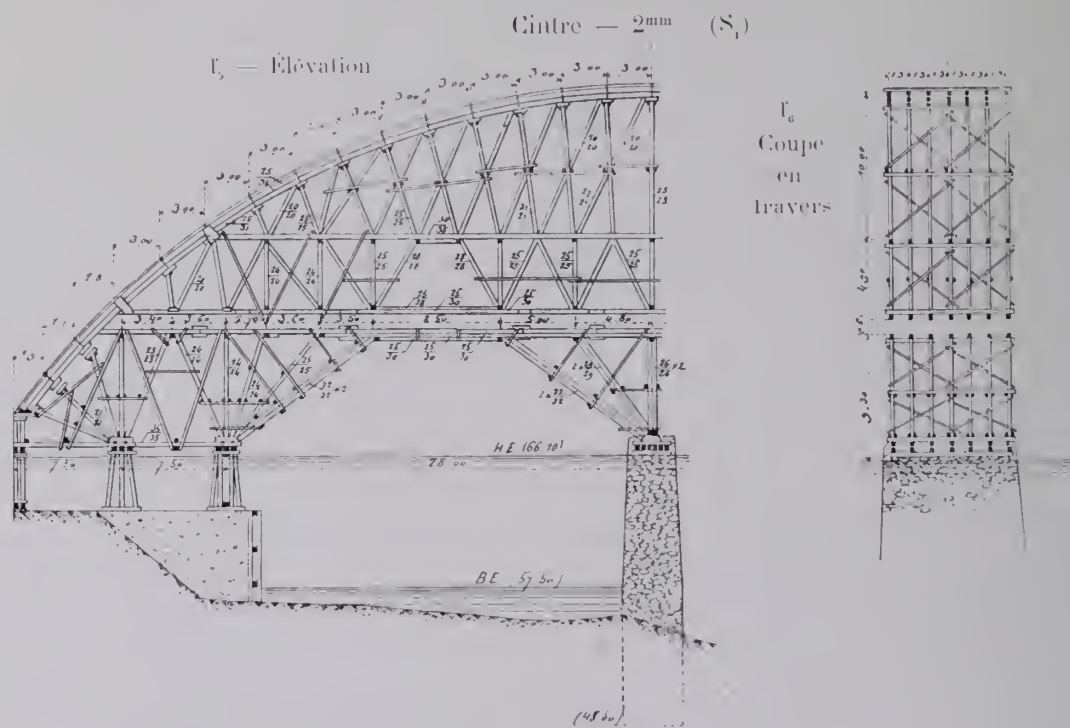
7. Cintre.

— On n'osa pas retrousser le cintre entre les deux berges. D'autre part, dans un torrent à crues de 8^m60 [6], on ne pouvait pas l'appuyer sur une palée en bois ; on le soutint en son milieu par une pile en maçonnerie fondée à l'air comprimé, sur caisson en mélèze, encastré de 0^m50 dans le schiste, à 9^m sous l'étiage. On la fit sauter à la mine, l'ouvrage fini (S_2).

C'était, pourtant, la fondation toute faite d'un pont à deux arches.

Sur berges, le cintre s'appuyait sur des socles en béton.

Cintre — 2^{mm} (S_1)



5. — Soient : h_1, la résistance d'une pierre taillée en cubes,
h_2, celle du mortier,
K, la résistance sur laquelle on peut compter pour la maçonnerie.

On a proposé la formule :

$$K = 1/3\, h_1 + 2/3\, h_2$$

formule indiquée dans la Zeitschrift für Architektur- und Ingenieurwesen, 1907, p. 403 à 440 « *Über weitgespannte Wölbbrücken* » — Karlsruhe, mai 1907, - Dr Ing. Fr. Engesser, - p. 426.

Elle donne ici 570^k, soit un coefficient de sécurité de 11 (S_1).

6. — L'Isonzo monte de 8^m en quelques heures (S_6).

Pendant qu'on fondait la pile du cintre, il y eut, de mai à décembre 1904, 6 crues de plus de 3^m50. Le 24 juin, le bateau installé pour battre les pieux fut coulé ; le 14 septembre, une partie de l'échafaudage fut emporté, un charpentier tué ; le 24 novembre (crue de 6^m), l'échafaudage, le sas à air, la grue, furent emportés (S_6).

On soigna les assemblages (tenons et mortaises), et on boulonna tous les croisements (S_1).

Φ_2 — amont (S''_3)



Comme on ne comptait pas construire par rouleaux, le cintre a été calculé pour « *presque tout le poids de la voûte* » (S_2), avec un travail maximum de 60^k (S_1).

8. Fondations (S_1). — On rencontra dans le conglomérat de rive gauche des fissures et des cavernes qu'on bourra de béton à 1 : 12.

Pour ne pas dépasser 4^k, on établit, au fond de chaque fouille, une dalle en béton à 1 : 2 : 3 (S_1) de 2^{m}20 d'épaisseur, ayant, à la rive gauche, 15^{m}4 × 14^{m}5, — à la rive droite, 20^m × 16^{m}5, armée de 4 cours de fers en I croisés, badigeonnés au préalable d'un lait de ciment.

Il y a, dans les deux dalles, 100 tonnes de fer.

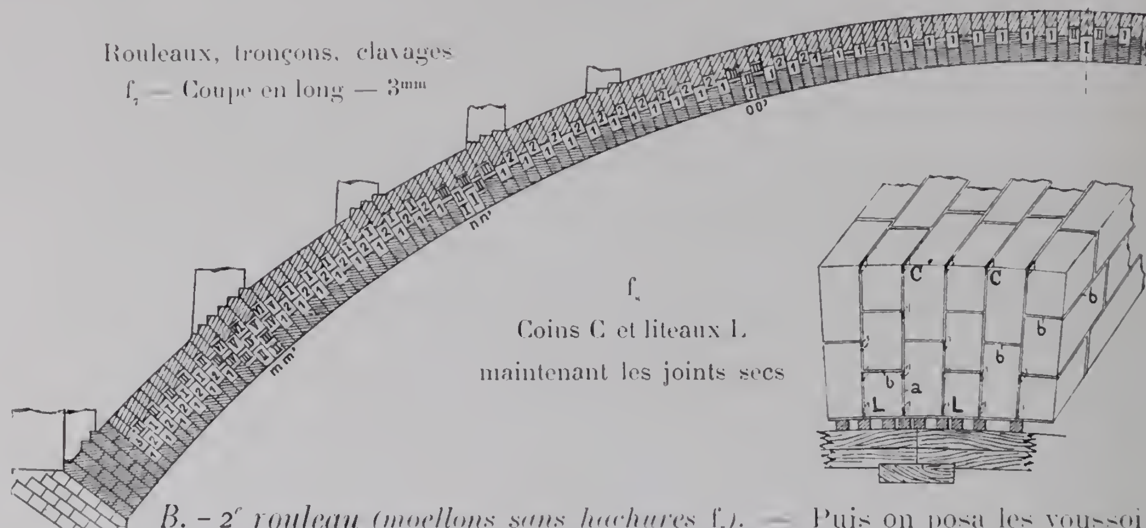
La pression de la voûte est étalée sur les dalles en béton par 3 assises de pierre de taille en gradins.

On eut soin de murailler et de bétonner (béton à 1 : 12) la fouille abandonnée de la culée rive gauche, et on en protégea le pied.

9. Exécution de la grande voûte (S_1). — *A. - 1er rouleau (hachures serrées, f.).* — On posa sur le cintre, à sec, tous les moellons de douelle ; on les répartit par des taquets en 8 tronçons [7] (S_3).

7. — La pierre taillée avec soin, glisse sur le platelage à partir de 55° sur la verticale.

Les joints de 16mm [8] (S_2), étaient maintenus par des coins C (f_8), et des liteaux L (S_1). On les mata tous au mortier de ciment Portland [9] à 1/3, à l'état de terre humide [10], avec des spatules en fer [11] (S_1), les intervalles des taquets demeurant vides.



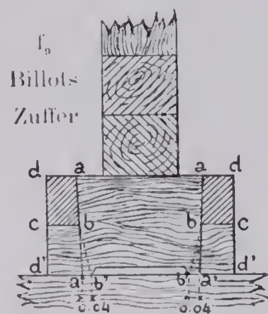
B. – 2e rouleau (moellons sans hachures f_7). — Puis on posa les voussoirs 1, 2 (f_7) sur lits de mortier dans les joints *b* (f_8), en matant les joints montants *a* (f_8).

Après prise, on clava à la fois les deux rouleaux, aux taquets *mm'*, *nn'*, *oo'*, par les moellons I et II (f_7) (S_1). On posa en même temps le queutage dans l'ordre I à VI (f_7) (S_1).

C. – 3e rouleau (hachures espacées f_7). — On posa les voussoirs et on mata aussitôt les joints *« sans s'astreindre à aucun ordre »* (S_1).

10. Décintrement.

— Les billots Zuffer, précédemment employés à Palmgraben [12], Schalchgraben [13], Krenngraben [14], Steyrling [15], ont été, à Salcano, disposés comme l'indique le croquis f_9 (S_1).



La surface d'appui *b'd'* était calculée pour 60k/0m01².

On enleva d'abord les angles *abcd* – ce qui ne réduit pas encore la surface d'appui, mais diminue la hauteur à scier.

Ensuite, on donna les traits de scie *bc'*, puis *bb'* (S_1).

On attaquait en même temps, aux 7 fermes, les billots de deux files transversales symétriques par rapport à la clef, en allant des retombées vers la clef au premier trait de scie, en sens inverse au deuxième (S_1).

Le premier fit tasser la clef de 4mm. Le deuxième, donné après arrêt du tassement, détacha le cintre (S_3). En moins de 5 heures, on libéra l'arc.

8. — On les avait prévus à 12mm. Mais, surtout dans les plus profonds (1m20), on ne pouvait introduire facilement le mortier à la truelle, bien que les lits eussent été dressés avec soin. On les élargit de 2 et 4mm, ce qui augmenta le développement de l'arc : on compensa, en réduisant de 6m à 8m l'épaisseur des assises de clavage (S_6).

9. — de l'*Adriatischen Portlandzement-Aktiengesellschaft* de Spalato.

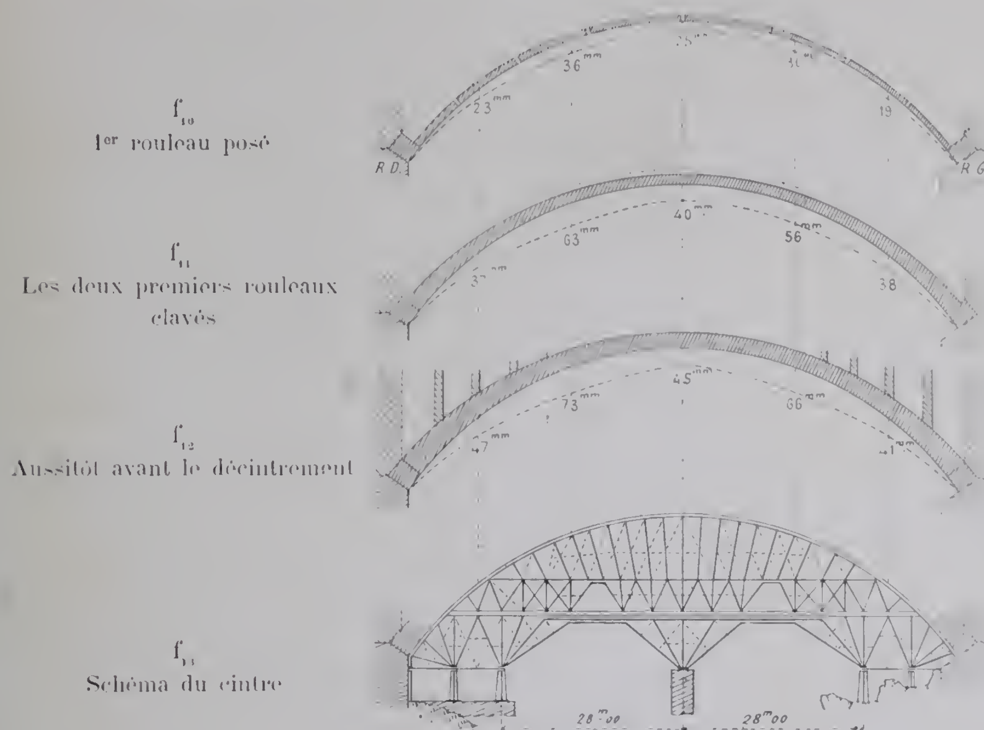
10. — A la fin du matage, l'eau refluait à la surface (S_6).

11. — A chaque coup de masse, on sentait vibrer le voussoir (S_6). On pouvait retirer à la main les coins C le lendemain du matage (S_4).

12. - $\widehat{A}^1$ Fr (> 40m)8 ; 13.- $\widehat{A}^1$ Fr (> 40m)9, Tome II. 14.- $\widehat{A}^1$ Fr (> 40m)17 ; 15.- $\widehat{A}^1$ Fr (> 40m)18, Tome III.

Les billots Zuffer se comportèrent « *de manière véritablement remarquable* »[16].

11. Tassements du cintre pendant la construction de la voûte (S_6).

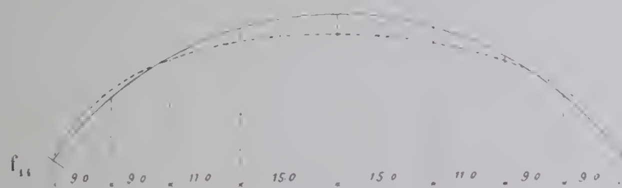


Le tassement a continué après le clavage des 2 premiers rouleaux [17].
Au-dessus des passes, la voûte a plus tassé qu'au droit des appuis.

12. Mouvements de la voûte au décintrement (S_6).

— Tout au contraire, au décintrement, elle s'est aplatie au cerveau et cambrée aux reins.

Axe de la voûte ——— avant / ------- après \ décintrement



Tassements (—) et relèvements (+) en *mm*

amont	0	+1	—1	—2	—5	—3	—0.5	+1.5	0
aval	0	+1	0	—2	—6	—3.5	—1.5	»	0

On a donné cette explication :

D'après l'épure, la résultante des actions sur le sol agit sur la moitié arrière. Créée par le décintrement, elle a comprimé l'éboulis et le conglomérat plus à l'arrière qu'à l'avant, et fait pivoter la culée vers l'arrière.

On n'a pas constaté de fissures dans la voûte.

Chaque culée a reculé de 0mm2 environ.

On avait surhaussé la clef de 20cm : elle n'a tassé que de 5cm. On a racheté la différence (15cm) en réduisant de 102cm à 87cm la revanche du rail sur l'extrados.

16. — « *in wirklich ausgezeichneter Weise* » (M. Zuffer. - S_6).

17. — contrairement à ce qui s'est passé pour la plupart des grandes voûtes construites par rouleaux (voir Tome V).

13. Mouvements de la clef dus aux variations de température (S_6).

Dates		Températures en degrés Celsius		Abaissements par rapport au 15 septembre 1905	
		au soleil	à l'ombre	de la température à l'ombre	de la clef
Septembre 1905	15 — 3^h s.	+ 35°	+ 27°	»	»
	18 — 8^h m.	»	+ 18°	9°	45mm
Janvier 1906	5 — 3^h s.	»	+ 3°	24°	55mm5
	8 — 3^h s.	+ 9°	+ 2°	25°	27mm5

14. Dates (S_1, S_3).

Fondations			juillet 1904 — mars 1905
Cintre	Pile en maçonnerie		octobre 1904 — février 1905
	Fermes		février — fin avril 1905
Grande voûte 18 jours de travail effectif (90mc par jour)	Commencement (après pose et maçonnerie des 5 premières assises)		5 juin 1905
	1er rouleau	Fin de la pose à sec	10 juin
		Fin du matage	14 juin
	2e rouleau. — Commencement		15 juin
	3e rouleau		25 juin — 1er juillet
	Décintrement		8 août
Achèvement des maçonneries			mi-novembre 1905
Ouverture à la circulation			19 juillet 1906 (S_3)

15. Quantités et Dépenses (Partie centrale, entre les clefs des voûtes voisines de la grande arche, – 9420mc) (S_6).

A. Quantités et Prix d'unité.

			Quantités	Prix d'unité
Fouilles dans la terre et le rocher			7600mc	2f18
Maçonneries à ciment Portland	Béton à 1 4 6		1189mc	28f98
	Moellons ordinaires		3338mc	28f98
	— appareillés en voûte		351mc	39f48
	Moellons équarris id.		171mc	54f86
	Parements vus de moellons ordinaires		2800mq	3f02
	Pierres de taille pour la grande voûte		1941mc	162f75
Dalles en béton armé des fondations	Béton à 1/2/3		1270mc	39f90
	Poutrelles en fer		102T	340f
Pont de service (Bois ronds 510mc ; bois équarris 116mc)			626mc	»
Cintre	Bois: Chêne 23mc; Bois tendre rond… 120mc, équarri 1036mc	Partie supérieure	568mc	»
		— inferieure	463mc	»
		Pieux	178mc	»
	Fers (Partie supérieure 4T7)		10T	»
	Pile en maçonnerie	Fondation à l'air comprimé	716mc	182f70
		Élévation	336mc	23f62
Poids de ciment Portland de Spalato			1066T3	

B. Prix totaux.

		Rive droite	Rive gauche	
Culées	Terrassements	19530^f	2541^f	
	Dalles en béton armé	52437^f	30355^{f}5	
	Pierres de taille sous les retombées	17577^f	11896^{f}5	
	Autres maçonneries	45486^f	6972^f	
		135030^f	51765^f	186795^f
Pilastres, jusqu'au niveau des retombées des voûtes voisines *(a)*				46620^f
Grande voûte *(b)*				286440^f
Maçonneries au-dessus de *a* et *b*				64260^f
Chape, gargouilles, remplissage				12180^f
Plinthes, dés, parapets				46515^f
Cintre (Pile en rivière : 142590^f)				287910^f
Défense et assèchement des fouilles				15750^f
Sondages, précautions contre le feu, travaux en régie				13020^f
Fouille rive gauche abandonnée				15540^f
				975030^f

16. Personnel (S_1, S_6).

Ingénieurs :

Projet d'ensemble et Direction générale des Travaux. — Service de la Construction des Chemins de fer de l'Etat.

« Hofrat » J. Zuffer, Directeur du Service, à Vienne.

Direction locale. M. Léopold di Gasperra, puis M. Otto v. Bertele, Ingénieurs en chef à Goritz. — M. Heinrich Bincer, Ingénieur (S_6).

Projet de détail et Surveillance des Travaux. M. Őrley, Ingénieur à Salcano (S_6).

Calculs. M. Robert Schönhöfer, Ingénieur (S_6).

Entrepreneurs : (Grande voûte et ses deux pilastres) : les frères Redlich et Berger.

SOURCES :

S_1. — Zeitschrift des œsterreichischen Ingenieur- und Architekten Vereines, 29 octobre 1909, p. 701 à 705, Pl. IX : « *Die gewölbte Brücke über den Isonzofluss bei Salcano* », Ingenieur Rudolph Jaussner, Inspektor im K. K. Eisenbahn-Ministerium.

Les dessins f_1 à f_8 sont extraits de S_1.

S_2. — Geschichte der Eisenbahnen der œsterreichisch - ungarischen Monarchie, VI Band, 1898-1908, II Band. « *Der Brückenbau der neuen Alpenbahnen. — A. Steinbrücken* ». Josef Zuffer, p. 74 à 87.

S_3. — Renseignements (S'_3) et photographie (S''_3) gracieusement donnés par le Ministère des Chemins de fer à Vienne.

S_4. — Ce que j'ai vu : (S'_4) octobre 1908, (S''_4) août 1909.

S_5. — Zeitschrift des œsterreichischen Ingenieur - und Architekten Vereines, 1908, p. 174 à 176 : « *Die Ausrüstung der grossen Wölbbrücken im Zuge der neuen Alpenbahnen* ». J. Zuffer, K. K. Ober-Baurat.

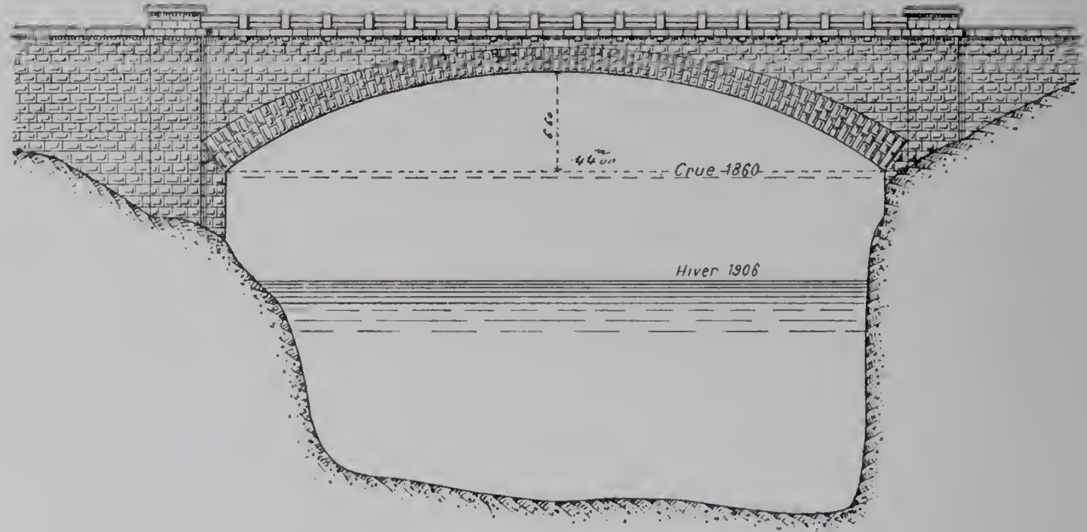
S_6. — Id., 1910. - 19 août, p. 529 à 532 ; 26 août, p. 541 à 546, « *Erfahrungen und Beobachtungen beim Bau der 85m weiten Wölbbrücke über den Isonzo bei Salcano* » von Ing. Dr. Leopold Őrley, Baukommissär der K. K. österreichischen Staatsbahnen.

PONT SUR LE HALLINGDALSELVEN, A SVENKERUD *(NORVÈGE)*

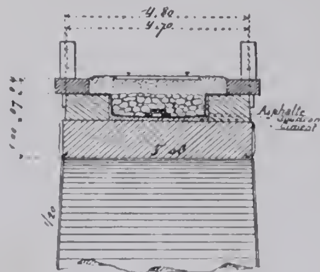
Chemin de fer de Christiania à Bergen

1905–1907 $\widehat{A}^1$ Fr (= $40^m,20$)

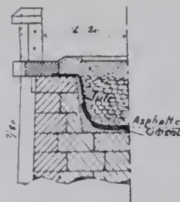
f₁ — Élévation — 2^{mm}



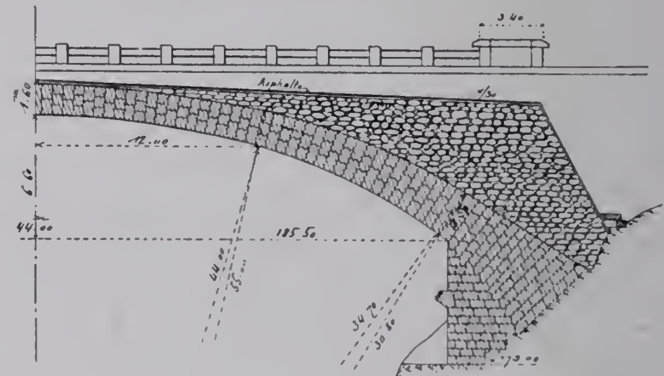
f_3 — Coupe en travers à la clef 5^{mm}



f_4 — Chape— 5^{mm}



f_2 — Coupe en long — $2^{mm}5$



1. Dates (S''_1).

Commencement des travaux.....	septembre 1905
Construction de la voûte.............................	10 juillet - 26 octobre 1906
Décintrement..	2 mai 1907
Ouverture à la circulation............................	13 mai 1907

2. Personnel (S''_1).

Projet : Service de la Construction des Chemins de fer de l'Etat norvégien.

Direction des Travaux : L'Ingénieur en chef du Chemin de fer de Bergen (partie Est).

Φ_4 (S…)

Cintre

f_5 — Élévation — 3mm

f_7 — Retombées — 7mm5

f_6 — Coupe en travers à la clef 7mm5

SOURCES : Celles du Pont sur le Strandeelven Â¹ Fr (> 40m)16 – Tome III.

PONT SUR LA MURG, PRÈS DE LANGENBRAND

(ALLEMAGNE, - Grand-Duché de Bade)

Chemin de fer de Weisenbach à Schönmünzach

1907-1909 $\widehat{A}^1$ Fr (> 40m) 21

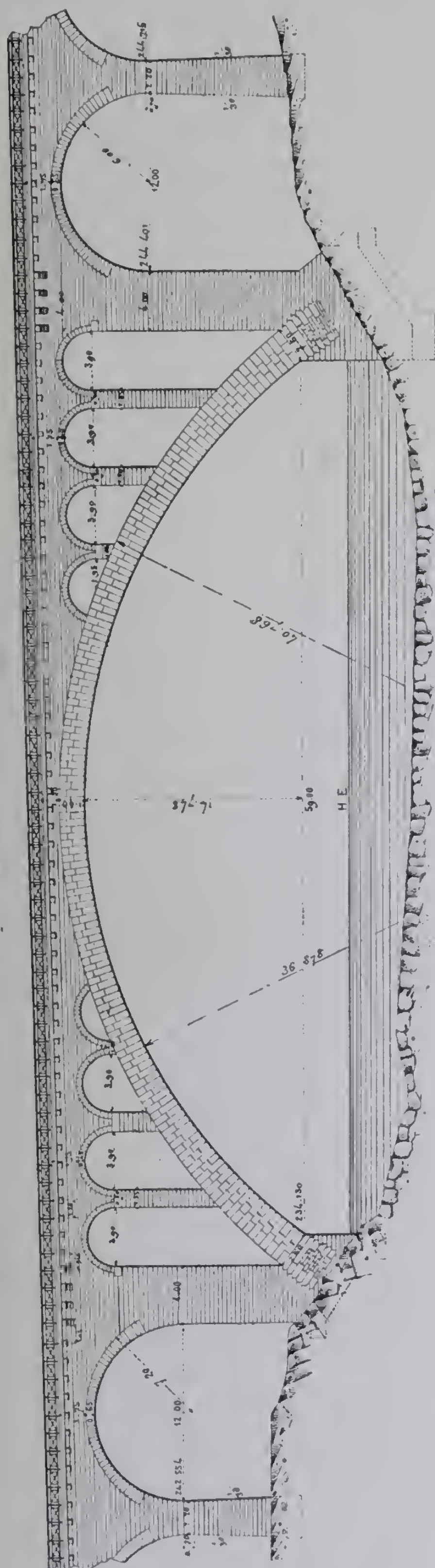
f_1 — Ensemble — 1mm

I. Dates (S''_1), (S_2).

Fondations...	1er septembre 1907 - 1er mai 1908
Grande voûte...	30 septembre - 14 décembre 1908
Décintrement...	8 février 1909
Achèvement des travaux...	fin août 1909 (S_2)

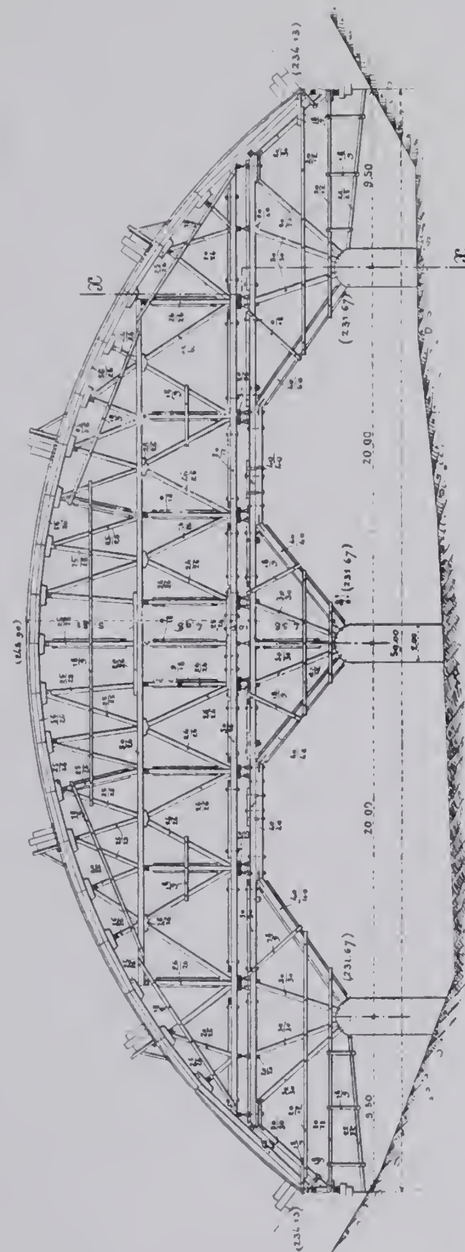
Φ_1 (S_2)



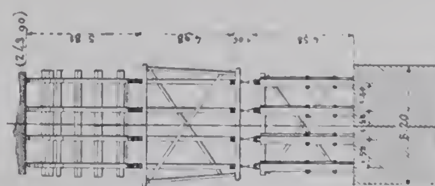


f₂ — Grande voûte — 2mm

Cintre — 2mm5



f₃ — Élévation



f₄ Coupe en travers sur xx de f₃

f₃ — Coupe en long — 4mm

f₄ — Coupe en travers à la clef — 5mm

f₅ — Plinthe — 2cm

2. Personnel (S''₁).

Projet et Direction des Travaux : Inspection de la Construction des Chemins de fer, à Gernsbach.

Entrepreneur : M. Wilhelm Bruch, de Berlin.

SOURCES :

S₁. — Dessins d'exécution (S'₁) et renseignements (S''₁), gracieusement communiqués par la Direction des Chemins de fer du Grand Duché de Bade.

S₂. — Deutsche Bauzeitung, 1910 : 17 septembre, p. 593 à 595 : 24 septembre, p. 609 et 610 ; 1er octobre, p. 629 à 634 : « *Eine neue Schwarzwaldbahn Weisenbach-Forbach* », von Regierungs-Baumeister Gaber, in Heidelberg.

PONT SUR LA CHARENTE[1], PRÈS DE **LUSSERAT** (*CHARENTE-INFÉRIEURE*)

Ligne de Saint-Jean-d'Angély à Saujon

1908-1910 $\widehat{A}^1$ $F^r = 40^m,22$

Φ_1 (S.)



1. Pourquoi on a fait une grande voûte. — Pour ne pas gêner la navigation.

2. Appareil. — *A. Bandeau.* — Le dessous de l'archivolte et les arcs passant par les queues des voussoirs divisent chaque joint en 5 parties égales.

B. Culées (S_2). — Au-dessus de murs à joints incertains et gros bossages, un couronnement en pierre de taille lisse ne semble pas à sa place.

Les bandeaux des voûtes latérales paraissent maigres.

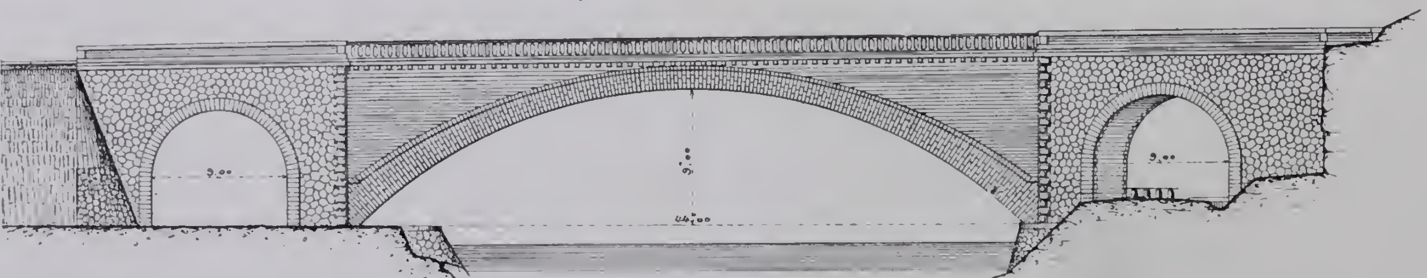
3. Fondation, à l'air comprimé, de la culée rive droite (f_1). On put, dans le caisson, déblayer l'argile à sec, jusqu'à 7^m60 sous l'étiage.

Après l'avoir rempli, on y comprima un coulis de ciment[2], à $2^k/0^m01^2$: il en entra très peu.

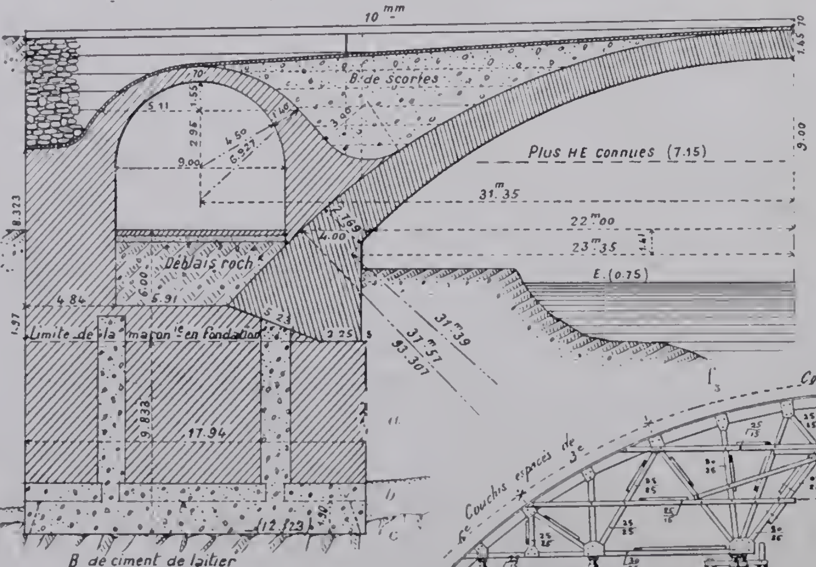
1. — A 3k en amont de Saintes.

2. — Comme au Pont de Marmande. (Annales des Ponts et Chaussées, février 1887 : *Fondations à l'air comprimé d'un pont sur la Garonne, à Marmande*, M. Séjourné).

f₁ — Élevation — 2mm



f₂ — Demi-coupe en long, côté rive droite — 2mm5

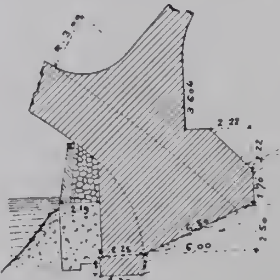


a) Argile d'alluvions.

b) Gravier.

c) Rocher calcaire.

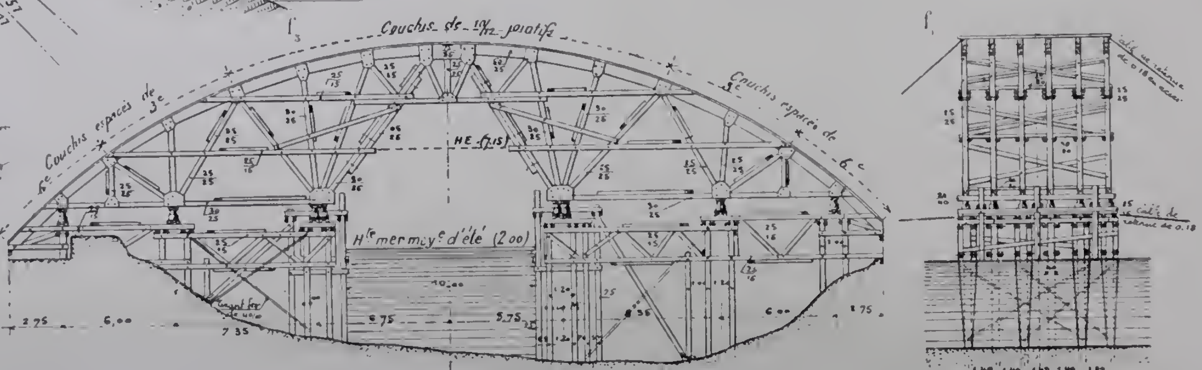
f₃ — Culée rive gauche — 2mm5



f₄ — Coupe en travers à la clef — 5mm



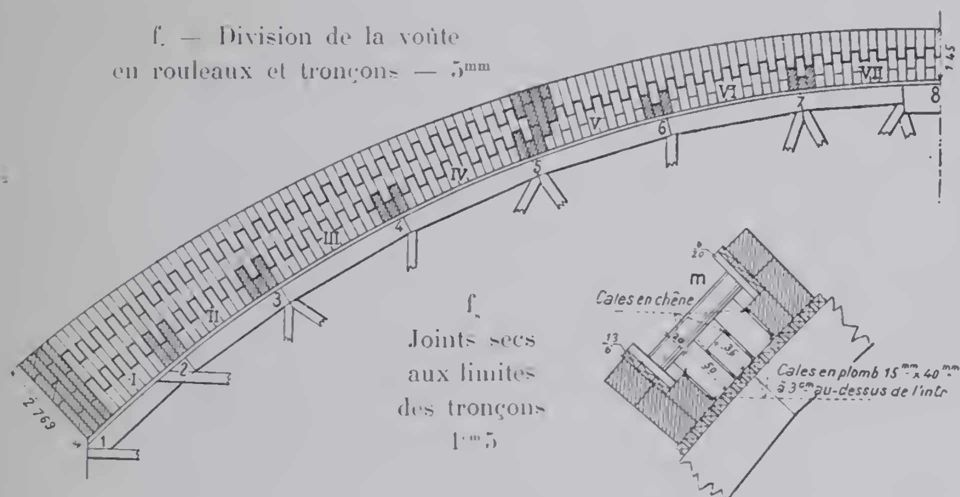
Cintre — 2mm5



Φ_2 (S_1)



1. Exécution de la grande voûte (f., f_1). — *A. - Division en rouleaux.* Elle a été construite en 3 rouleaux, le 2e limité aux reins.

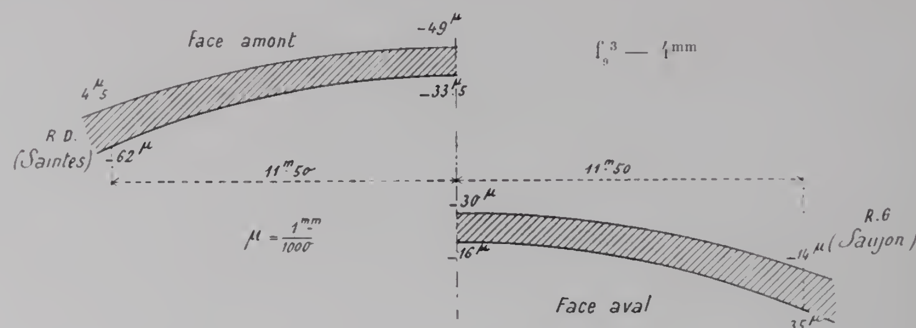


f. — Division de la voûte en rouleaux et tronçons — 5^mm

f_1 Joints secs aux limites des tronçons 1^cm5

B. - 1er Rouleau. — On l'a exécuté en 13 tronçons, séparés, au-dessus des points fixes du cintre, par 14 intervalles formés de 3 voussoirs posés à sec (f_1).
Les moellons de queutage du 1er rouleau s'appuyaient sur des madriers *m* (f_1).

5. Mouvements au décintrement (mesurés avec 8 appareils Manet-Rabut à tiges de 1^m) (S''_1).



f_9^3 — 4^mm

6. Mouvements dus à la température (S''_1). — Pour un abaissement de température moyenne de 17° (de + 13° à — 4°), on a observé un abaissement à la clef de 6^mm [4].

7. Dates (S''_1).

Fondations	avril-décembre 1908
Grande voûte	août-octobre 1909
Décintrement	26 octobre 1909

8. Personnel (S''_1).

Ingénieurs en chef	jusqu'en 1908	M. Meunier.
	après	M. Perrier.
Ingénieur ordinaire		M. Alexandre.

Entrepreneurs : MM Marlaud.

3. — De ces chiffres, M. Alexandre conclut qu'au décintrement, la courbe de pression passait, à la clef, à 6^cm au-dessus de la fibre moyenne, — aux reins, près du 1/3 inférieur (S_2).

4. — M. Alexandre donne ce calcul :
Le développement moyen de la voûte est de 54^m, dont pour les joints de mortier : 0,4 × 54^m = 21^m60.
Si on admet pour le coefficient de dilatation du mortier de ciment, 11×10^{-6}, et si on considère la pierre calcaire comme non dilatable, on trouve, pour un abaissement de 17°, un raccourcissement de :

$$17° \times 11 \times 10^{-6} \times 21^m60 = 4^{mm}$$

En supposant encore que la courbe déformée reste un arc de cercle, l'abaissement correspondant à la clef est 4^mm5 au lieu des 6 mesurés.

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution (S'_1), renseignements (S''_1) et photographie (S'''_1) gracieusement communiqués par M. Alexandre.

S_2. — Ligne de Saint-Jean-d'Angély à Saujon. — Rapport sur l'exécution des travaux et les dépenses effectuées. — MM. Perrier et Alexandre, - p. 55 à 63, Pl. 8 et 9 : « *Pont sur la « Charente* ».

S_3. — Ce que j'ai vu — octobre 1909.

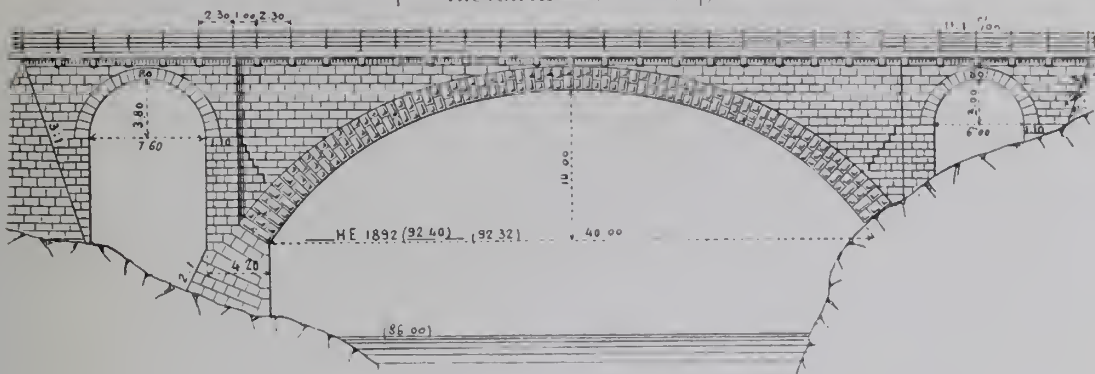
Ce qui n'est pas spécifié S_1 ou S_3 est de S_2.

PONT SUR LE NIDELVEN, A BOÏLEFOS (NORVÈGE)

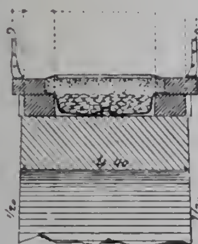
Ligne d'Arendal à Aamli

1908-19.. $\widehat{A}^1$ Fr (= 40m)23

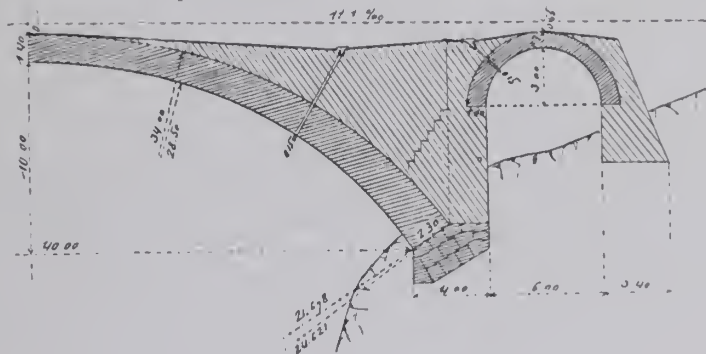
f_1 — Élévation — 2mm (S_1)



f_3 — Coupe en travers à la clef — 5mm (S_1)

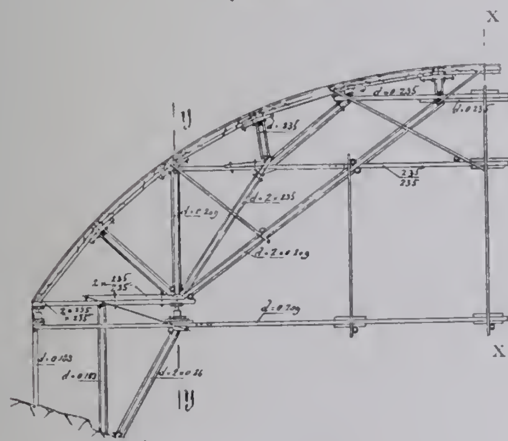


f_2 — Coupe en long — 2mm5 (S_1)



Cintre — 3mm (S_2)

f_4 — Demi-élévation



Coupes en travers

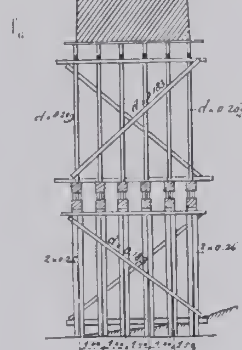
sur *xx* de f_4

f_5



sur *yy* de f_4

f_6



I. Personnel (S_3).

Projet : Service de la Construction des Chemins de fer de l'État norvégien.
Direction des Travaux : L'Ingénieur de la ligne Arendal-Aamli.

Φ_4 (S_3)



SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution gracieusement communiqués par M. O. Carlsen, Directeur de l'École Polytechnique de Bergen, — avril 1911.

S_2. — Dessins du cintre et renseignements, gracieusement adressés par M. Fleischer, (Direction des Chemins de fer de l'État norvégien à Christiania), — mai 1912.

S_3. — Photographie qu'a bien voulu me donner M. Jenssen (Direction des Chemins de fer de l'État norvégien à Christiania), — novembre 1912.

PONT SUR LA THUR, A LICHTENSTEIG *(SUISSE, - Saint-Gall)*

Ligne Romanshorn-St. Gall-Uznach (Bodensee-Toggenburg-Zurichsee)

1907-1909 $\widehat{A}$ ¹ Fᵉʳ — 40ᵐ,24

Φ_1 (S)

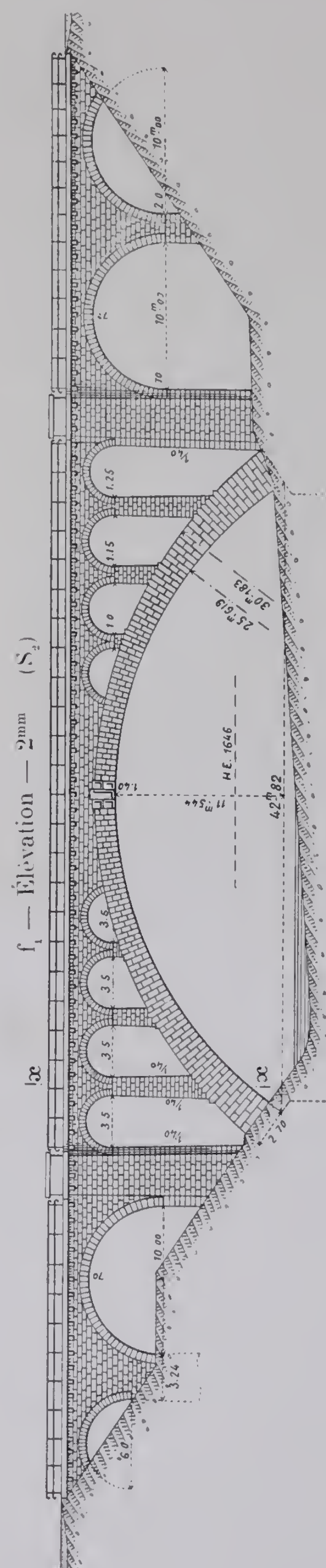


1. Efforts dans la voûte en kg $\overline{0^m01}^2$, *(Méthode Ritter)*.

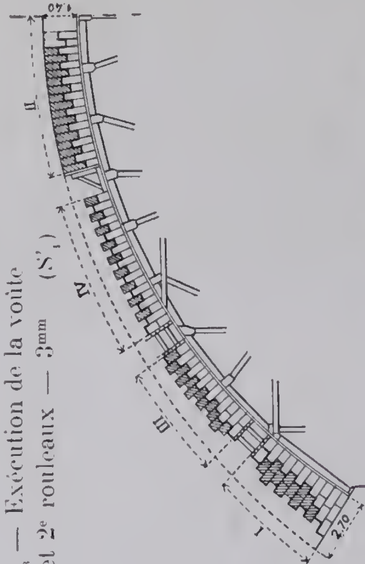
sous une surcharge de 1800ᵏ m²:	Clef	Joints de rupture	Retombées
a. - sans tenir compte des variations de température (S''_1)........	27ᵏ5	28ᵏ9	23ᵏ2
b. — pour une variation de température de 15° (S_2).	31ᵏ5	— 1ᵏ5 (tension)	
$E = 1 \times 10^5$ en kg $\overline{0^m01}^2$; $\alpha = 8{,}8 \times 10^{-6}$ (S''_1)			
c. — pour un recul des culées de 1ᶜᵐ (S_2) :			
c_1. — avec résistance à la tension..............	38ᵏ		— 9ᵏ9 (tension)
c_2. — sans résistance à la tension..............	40ᵏ		42ᵏ

2. Cintre. — *A. - Efforts* (S'_1). — Les montants et contrefiches travaillent à 23ᵏ5 ; les vaux à 80ᵏ (limite admise) ; les billots de décintrement, à 20ᵏ normalement aux fibres, à 60ᵏ dans le sens des fibres.

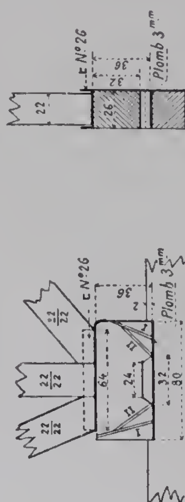
Les pieux portaient au plus 12ᵀ5.



f_1 — Élévation — 2mm (S_2)

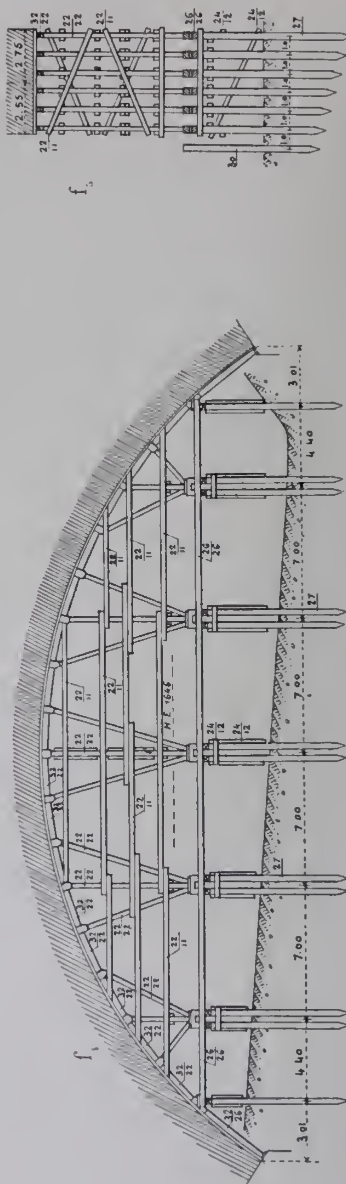


f_3 — Exécution de la voûte 1er et 2e rouleaux — 3mm (S'_1)



Billots de décintrement — 2mm (S'_1)

f_6 — Vue de face f_7 — Vue de côté



Cintre — 2mm,5 (S'_1)

f_4 f_5

f_2 — Coupe en travers sur xx de f_1 — 5mm (S_2)

B. - Surhaussement de 80^mm (S'₁). — On l'a calculé par la formule :

$$4^{mm} + 2^{mm}5 \left| 2\,a \text{ (portée en mètres)} - b \text{ (montée en mètres)} \right|.$$

3. Dates (S''₁).

Commencement des travaux	automne 1907
Grande voûte	octobre 1908 — mai 1909
Décintrement	juin 1909
Ouverture à la circulation	octobre 1910

4. Personnel (S''₁).

Projet : Service de la Construction du Bodensee-Toggenburgbahn.
Direction des Travaux : M. B. Weber, Ingénieur en Chef.
M. Hünerwadel, Ingénieur.

Exécution en régie.

SOURCES :

S_1. — Dessins (S'₁) et renseignements (S''₁) gracieusement communiqués, en septembre et novembre 1912, par M. Acatos, Ingénieur en chef du Bodensee-Toggenburgbahn, à Saint-Gall.

S_2. — Bodensee-Toggenburg-Zürichsee. - Denkschrift über die Eisenbahn-Verbindung Romanshorn-S^t.Gallen-Wattwill-Uznach, - p. 95, Pl. 11 : « *Der Thurviadukt bei Lichtensteig* ». — Zollikofer et Cie, Saint-Gall, 1911.

S_3. — Ce que j'ai vu — juillet 1912.

PONT SUR LA THUR, A KRUMMENAU *(SUISSE, - Saint-Gall)*

Ligne d'Ebnat à Nesslau

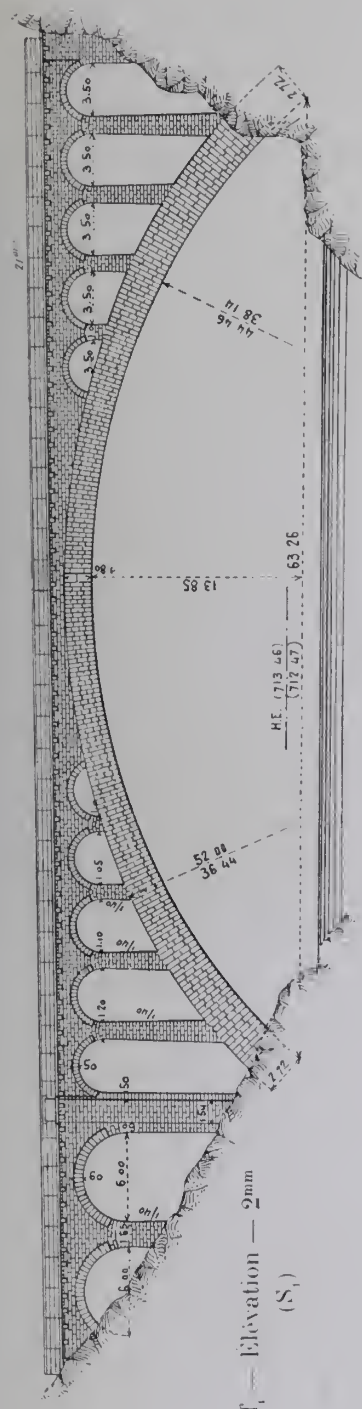
1910-1911 $\widehat{A}^1$ Fr ($\geqslant$ 40m)25

Φ. (S.)

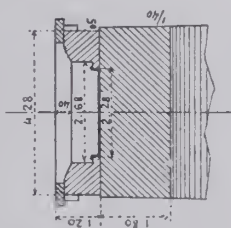


1. Efforts dans la voûte, en kg/$\overline{0^m01}^2$ (S_1), calculés sans tenir compte de la résistance à la tension.

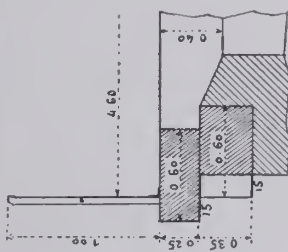
			Côté Ebnat (RD) Retombée 32m5	28m	18m	9m	Clef 0	Côté Nesslau (le plus haut) (RG) 9m	18m	28m	Retombée 32m5
Distance horizontale du milieu du joint à la clef			32m5	28m	18m	9m	0	9m	18m	28m	32m5
Sous le poids propre	Extrados		15k	8k	14k	20k	18k	»	»	»	»
	Intrados		**20**	**31**	**26**	**22**	**25**	»	»	»	»
Sous la surcharge :											
1° sans tenir compte des variations de température	Extrados	Effort MAX..	**30**	**14**	**20**	**29**	**26**	**34**	**23**	**10**	**22**
		— min..	7	5	8	12	15	17	9	3	0
	Intrados	— MAX..	**31**	**33**	**33**	**32**	**31**	**27**	**31**	**35**	**39**
		— min..	8	23	17	15	20	9	15	27	17
2° pour une variation de température de ± 15°	Extrados	Effort MAX..	**36**	»	»	»	**30**	**36**	»	»	»
		— min..	»	»	7	»	11	»	»	»	»
	Intrados	— MAX..	»	»	**34**	»	**36**	»	»	**37**	**46**
		— min..	2	»	»	»	15	7	»	»	»



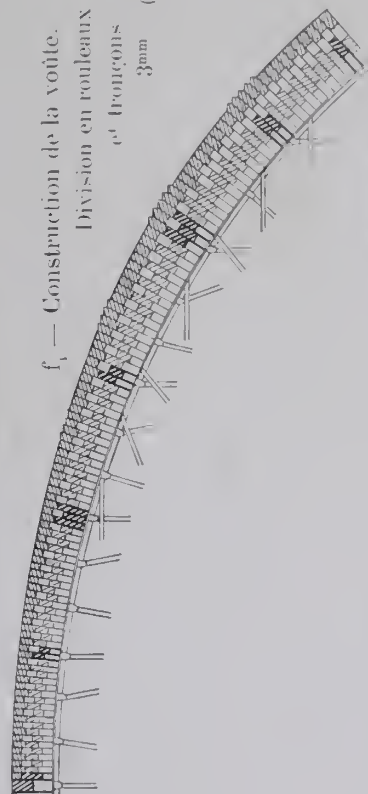
f1 — Élévation — 2mm (S1)



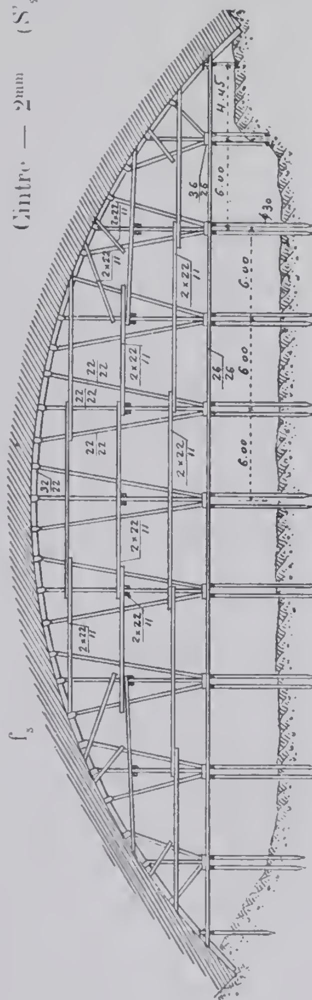
f2 — Coupe en travers à la clef — 5mm (S1)



f3 — Couronnement — 2mm (S1)



f4 — Construction de la voûte. Division en rouleaux et tronçons 3mm (S1)



f5 Cintre — 2mm (S'2)

f6

2. Cintre (S'₂). — *A. - Efforts.* — Les montants et contrefiches travaillaient au plus à $18^k6/\overline{0^m01}^2$, les vaux à 60^k, le platelage à 87^k.

Les pieux, de 28^{cm}, battus au refus de 7^{mm}, avec un mouton de 480^k tombant de 4^m, portaient 13 tonnes.

B. - Surhaussement de 130^{mm}. — On l'a calculé par la formule :

$4^{mm} + 2^{mm}5$ [2 *a* (portée en mètres) - *b* (montée en mètres)].

C. - Prix de revient.

1° Palées [1].			
Fournitures		3.144f60	
Pieux : 49mc3 à 33f = 1626f90.			
Main-d'œuvre		3.054f25	
Outils et frais généraux (9 %)		557f90	
Brise-lame pour protéger les palées		2.125f	8.881f75
2° Cintre proprement dit.			
Fournitures :			
Bois équarri : 194mc à 55f	10.670f		
Planches : 23mc à 50f	1.150f		
Fers	2.969f		
Divers	350f	15.139	
Main-d'œuvre :			
Façon des bois [2]	1.260f		
Transport et montage [2]	2.322f60		
Abaissement du cintre, demontage, transport au dépôt	1.102f50	4.685f10	
		19.824f10	
Outils et frais généraux 9 %		1.785f15	21.601f25
Prix total du cintre			30.490f
A déduire, valeur du matériel conservé			4.990f
Prix net du cintre (sans bénéfice de l'Entrepreneur)			25.500f
soit par mc. de maçonnerie de voûte [3]		32f70	
par mq. de surface d'élévation sous la douelle		37f	

D. - Salaires. — Prix de l'heure (S''₂).

Maître-charpentier	1f
Charpentier	0f63
Maçon	0f63
Mineur	0f50
Manœuvre	0f43

1. — Longueurs moyennes : d'un pieu, 5m73 ; de fiche, 1m51. — Le mètre courant de pieu a coûté, y compris les sabots, 9f45.

2. — La main-d'œuvre a coûté, par m. c. de bois équarri : façon des bois, 6f50 ; transport et montage, 12f.

3. — Par m. c. de maçonnerie de voûte (780mc), on a employé 0mc365 de bois; - par m. c. de bois (285mc), 28k de fer, 40, 8 heures de travail.

3. Exécution de la voûte.

— Comme au pont de Montanges[4], les voussoirs se découpent, non seulement d'une assise à l'autre, mais dans la même assise (S'''_2).

Le mortier n'a pas été maté, mais seulement fiché (S_1).

4. Dates.

Commencement des travaux	juillet 1910
Grande voûte	mai — 10 août 1911
Décintrement	8 septembre 1911
Ouverture à l'exploitation	1er octobre 1912

5. Tassement des fermes de rive, en *mm* (S_1).

		Côté Ebnat (RD)						*Côté Nesslau (RG)*			
Distance horizontale à la clef		*22m 40*		*11m 60*		*Clef*		*12m 20*		*22m 20*	
Dates (1911)		*amt*	*avt*	*amt*	*avt*	*amt*	*avt*	*amt*	*avt*	*amt*	*avt*
1er rouleau	27 mai	-4	0.5	4	3	0.5	0.5	6	7	3	0.5
	6 juin	7	10.5	5	4	6	6.5	3.5	3	2	10
	16 juin	12.5	14	11	10.5	8.5	9	8	7.5	7.5	14.5
2e et 3e rouleaux	23 juin	13	13.5	11.5	11.5	5	6	7	7	8	15
	11 juillet	29	34.5	24.5	26	18	18	24	25	26	37.5
4e rouleau	19 juillet	33.5	35	27	27	20.5	20.5	28	28.5	28	37.5
	1er août	30.5	33.5	27.5	27	24	24	28	28.5	28	36.5
	14 août	32.5	35.5	33	28.5	26.5	24	33	32	29.5	39.5

6. Tassement des bandeaux, en *mm* (S_4).

	Côté Ebnat (RD)						*Côté Nesslau (RG)*			
Distance horizontale à la clef	*22m 40*		*12m 80*		*Clef*		*11m 80*		*22m 20*	
Dates des observations (1911)	*amt*	*avt*	*amt*	*avt*	*amt*	*avt*	*amt*	*avt*	*amt*	*avt*
1er août (par rapport au 19 juillet)	0	1.5	2	1	4.5	4.5	2	2	0	0
14 août	2	2	5.5	1.5	2.5	0	5	3.5	1.5	3
8 septembre (décintrement) (toutes les piles et les 6 voûtes extrêmes d'évidement construites.)	0	1	2	2	4.5	2	2	2	1	1
19 septembre (les voûtes d'évidement achevées.)	9.5	6	9.5	17	11	11	12	14	8	8.5
1er décembre (le pont achevé)	6	2	6	2	11	13	13.5	13.5	10	1.5

7. Personnel.

Ingénieurs.

Projet : Service de la Construction du Bodensee-Toggenburgbahn.

Direction des Travaux : M. R. Weber, Ingénieur en chef.

Entrepreneurs : MM. Aebli, Stambach et Cie.

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution gracieusement communiqués par M. Acatos, Ingénieur en chef du Bodensee-Toggenburgbahn, à Saint-Gall.

S_2. — Documents qu'ont bien voulu me communiquer, à Krummenau, MM. Aebli et Stambach :

S'_2. — Dessins et photographie du cintre. S''_2. — Etat des dépenses du cintre.

S'''_2. — Photographie de la voûte en construction.

S_3. — Ce que j'ai vu — juillet 1912.

S_4. — Schweizerische Bauzeitung, 1913 : 1er février, p. 53 à 57 ; 8 février, p. 69 à 73. « *Die Bahnlinie Ebnat-Nesslau* », von Ingenieur A. Acatos, Oberingenieur-Stellvertreter der B.T.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ [1]

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES

SOUS ROUTE

Série $\widehat{\mathbf{A}}^{n}\,r^{te}$ $(\geqslant 40^{m})$ [2]

Voir Préliminaires, Tome III, p. 3 et 4
1. — pour la définition des arcs « assez surbaissés ».
2. — pour le sens de ce symbole.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	ENSEMBLE Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	GRANDES VOÛTES INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS CORPS Clef *Retombées*	ÉPAISSEURS TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1m3 de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg 0m01² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEME[NTS] DES TYMPA[NS] 2° *DÉCORAT[ION] DES TÊ[TES]*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
du **Vieux Château** à **Vérone** *Italie* 1354–1356 $\widehat{A}^n$ r^te (> 40m) 1 *3 voûtes en arc :* *1 de 48m70 à 1/4,024 (RD) ;* *1 de 28m51 à 1/5,384 ;* *1 de 24m à 1/4,403 (RG).*	*119m 44* *entre culées* 22mm 22mm 15m	Clef Imposte 3m95 6m50 *6m80* *7m35*	Arc de cercle **48m,70** *12m 10* $\frac{1}{4,024} = 0,248$ *30m 55*		1m50 *1m 80 (RD)* *2m 00 en quelques points, RD.*	Bandeaux : PT [1] irrégulière Calcaire Douelle : Br [1] Quelques chaînes de PT [1]		
de **Seythenex** *France* 1908–1911 $\widehat{A}^n$ r^te (> 40m) 2 *2 voûtes en arc de cercle de 41m19 et 39m665 ;* *sur chaque rive, une voûte en plein cintre de 11m.*	*125m 43* 0 56m	3m80 *2m 80* Pas de fruit 0m60	Arc de cercle *Voûte rive droite* **41m,19** *10m 05* $\frac{1}{4,098} = 0.243$ *26m 13* *Voûte rive gauche* **39m,665** *10m 05* [7] $\frac{1}{3,946} = 0.253$ *26m 13*	0m90 *1m 10*	0m,90 *1m 10*	PT [1] 2 rangées de voussoirs Pierre de Seythenex (1400k à 1600k) *Ciment* *Vicat n° 1 — 600k*	Pression maxima sous la surcharge : Clef : 23k Retombées : 23k *Méry* Surcharge : 400k 1m²	1° Chaus[sée] sur plate f[orme] en béton a[rmé] portée [par] des colo[nnes] en béton [...] contreve[ntées] en lon[gueur] et en tr[avers] à 4m50 [de] la chau[ssée] Dosage du béton : Ciment Sable Gravier 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

7. — La retombée rive gauche est à 1m78 au-dessus de la retombée rive droite.

SÉRIE Â[n] r[te] (⩾ 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE

(F)ONDATIONS (Na)ture du sol (P)rofondeur (sou)s l'étiage Pressions sur le sol kg 0m01² Procédé	EXÉCUTION — GRANDES VOÛTES — CINTRES — FERMES Type Matière Appareils de décintrement	Nombre Épaisseur Écartement d'axe en axe Surhaussement	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont Temps entre le dernier clavage et le décintrement Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Culée (rive) gauche : *Terre (co)mpacte (et) pierrailles* Pression maxima : 2k *Massif (de bé)ton, armé (de fer)s croisés, fers ronds* Pile. Culée (riv)e droite : *Rocher* » »	*Voûte rive droite* Retroussé sur 40m Grands arbalétriers *Voûte rive gauche* Fixe Montants et contrefiches *Sapin* Boites à sable	3 *Cintre retroussé* 27c *Cintre fixe* 20c 1m25 *50mm*	Pour les 2 cintres : 170mc 3000k 17248f [6]	0mc63 11k1 63f5	2 rouleaux, chacun en 7 tronçons. Joints secs au-dessus des points fixes du cintre.	Voûtes nues *15 jours* 30 novembre	A chaque voûte : t_c 29mm t'_v = 0	Q = 2020mc Q : S_p = 4mc23 Q : W = 0mc20 Q : W' = 0mc29 [5] D = 136343f D : S_p = 286f1 D : W = 13f6 D : W' = 19f8 D : Q = 67f5 [5]

(Pou)r le (c)alcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.
6. — Forfait comprenant aussi les cintres des voûtes d'accès.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ

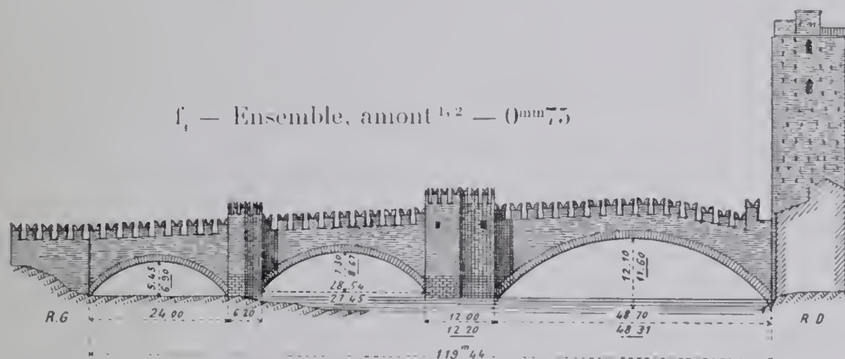
PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE $\widehat{A}^n$ 1te (⩾ 40^m)

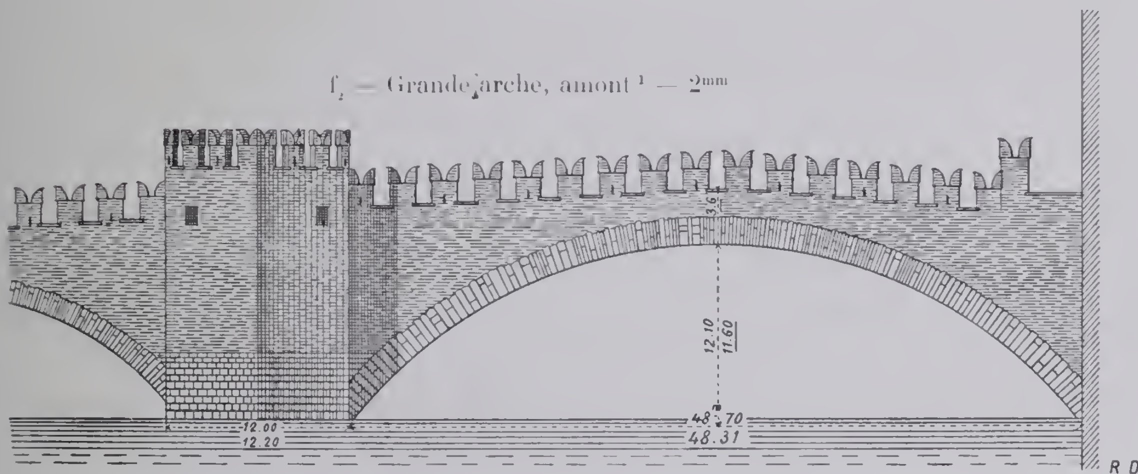
MONOGRAPHIES

PONT DU VIEUX-CHÂTEAU *(CASTELVECCHIO)* SUR L'ADIGE A VÉRONE *(ITALIE)*

1354-1356 $\widehat{A}^n$ 1te (⩾ 40^m) 1



f_1 — Ensemble, amont[1,2] — 0^{mm}75



f_2 — Grande arche, amont[1] — 2^{mm}

1. — Ces deux figures, réduites de S_1, Pl. XVIII, ont été rectifiées d'après mes photographies.
Les dimensions en ont été relevées par M. Biadego (S_1). On a souligné celles mesurées par M. l'Inspecteur Général de Dartein, qui a bien voulu me communiquer ses minutes.

2. — Gauthey donne un dessin fort inexact du pont avec une grande arche en anse de panier de 48^{m}73, 2 arches en plein cintre de 15^{m}27 et 11^m. (*Construction des Ponts*, tome I, p. 26, Pl. I, fig. 20. — Paris, 1809). Il a été reproduit par Croizette-Desnoyers. (*Construction des Ponts*, Pl. IV, fig. 5).

ϕ_1 — amont (S_2)

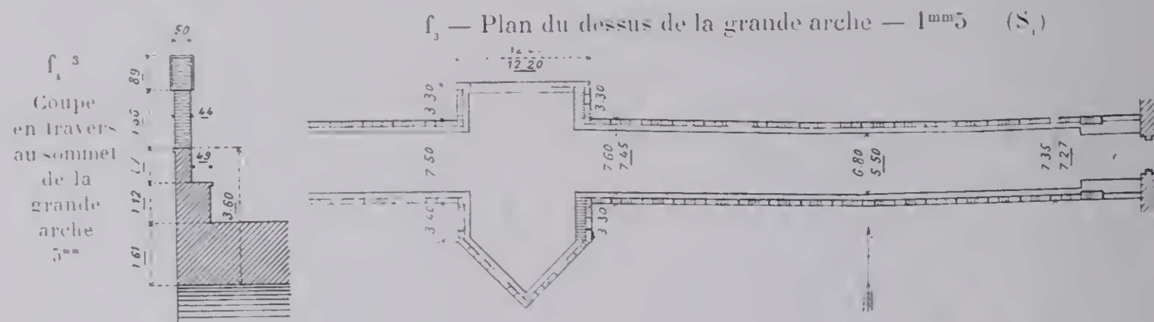


1. Grande arche. Courbe en plan. — La grande arche est en chevron courbe contre le courant.

La flèche est (S_1) :

à la tête amont.. 0m23

à la tête aval.. 0m78



f_4 [3] Coupe en travers au sommet de la grande arche 5mm

f_3 — Plan du dessus de la grande arche — 1mm5 (S_1)

La largeur est (S_1) :	entre têtes	entre parapets
au droit de l'imposte........	7m35	6m50
au droit de la clef........	6m80	5m95

3. — Relevé de M. de Dartein.

A-t-on voulu continuer la courbe du chemin d'accès ? Le cintre s'est-il déformé ? La voûte a-t-elle été mal exécutée ?

Φ_2 — amont (S₂)



§ 2. **Matériaux.** — *A. Pile* (S_1). — La base, jusqu'à 4^m environ au-dessus des eaux ordinaires, est revêtue d'assises horizontales de marbre blanc et rouge, de 0^m56 de hauteur, en morceaux de 1^m50 à 2^m et jusqu'à 2^m75 de longueur, quelques-uns empruntés à des monuments romains détruits.

Au-dessus, tout est en briques.

B. Bandeaux. — Les bandeaux ont des creux, des bosses, des surplombs.

Les voussoirs en pierre de taille calcaire, en général sans saillie sur les tympans ni sur la douelle, sont fort irréguliers d'épaisseur, de hauteur et d'extrados. Ils ne sont pas ravalés. Quelques-uns ont leur face oblique sur la tête. Aux reins, à l'amont, quelques-uns sont cassés.

C. Douelle. — La douelle, en briques dont beaucoup sont creusées, est traversée, d'une tête à l'autre, d'assises de pierre de taille calcaire.

D. Dimensions des briques (S_1). — $22^{cm} \times 13^{cm}5 \times 6^{cm}5$ $27^{cm} \times 13^{cm}5 \times 5^{cm}5$.

3. Dates (S_1).

— Le pont a été commencé en 1354 par Can Grande II della Scala, podestat de Vérone, en même temps que le Vieux-Château auquel il sert d'accès du côté du fleuve. La construction n'aurait duré que 3 ans (1354-1356) [4].

François Ier d'Autriche le fit réparer en 1824.

4. Ingénieurs (S_1).

— Peut-être Jean de Ferrare et Jacques de Gozzo, qui auraient, 20 ans après, construit le pont « *delle Navi* » à Vérone [5].

4. — De 1345 à 1377, on a construit en Italie 5 grands ponts :

1345 (date donnée par Ferroni). — Pont Vieux « *Ponte Vecchio* » dit aussi Pont des Orfèvres, sur l'Arno, à Florence, dû à Taddeo Gaddi. — Arc du milieu : 29^m189, et 4^m476 de flèche.
« *De la véritable courbe des Arches du Pont de la Trinité, à Florence* ». — Mémoire géométrique et historique de Pierre Ferroni. — Inséré dans le tome XIV de la Société italienne des Sciences (1808).

1351-1356. — Pont couvert, sur le Tessin, à Pavie. — 6 arches : les 3 plus grandes en arc. - 2 petites en plein cintre, - une intermédiaire qui paraît en plein cintre (S_1).
D'après une inscription sur la première pile rive gauche, rapportée par Malibran, on a commencé en 1351 à le réparer ou à le refaire.
Morandière en donne (Pl. 61, fig. 1 à 5) des dessins d'après Malibran. — La plus grande arche, celle de rive droite, a, à l'échelle, environ 28^m.
J'ai contrôlé ces dessins par mes photographies.
Gauthey donne un dessin et une description fort détaillée d'un pont saugrenu, qui n'a rien de commun avec l'ouvrage existant : 7 ogives égales, tympans évidés en triangle, pile à coupe horizontale en forme de lentille (*Construction des Ponts*, tome I, p. 22. Pl. I, fig. 24. 24 bis, — Paris 1809).

1354-1356. — Pont du Vieux-Château, sur l'Adige, à Vérone. — 3 arcs — $\widehat{A}^n$ 1te (> 40^m)^1

1373-1375. — Autre Pont sur l'Adige, à Vérone, dit « *delle Navi* », ruiné plusieurs fois par des crues. — 4 arcs de 16^m80, 24^m50, 15^m35 et 22^m40 (S_1), construit sous Can III della Scala (ou Can Signorio), frère de Can II.

1370-1377. — Pont de Trezzo, sur l'Adda, ruiné en 1416. — Arc de 72^m — $\widehat{A}^1$ 1te (> 40^m)^1 — Tome III.

5. — Ils sont désignés comme Ingénieurs du Pont de Pavie par Torello Saraina dans son « *Histoire de Vérone* », 1649. — (Malibran : Mission d'Italie).

SOURCES :

S_1. — G. B. Biadego : « *Del Ponte nuovo sull' Adige a Verona* », Vérone, Turin, 1885. Memoria IV, p. 251, Pl. XVIII. — Cette planche indique le pont tel qu'il a été dessiné, à la fin du XVIIIe siècle, par l'Ingenieur Bertolini, Professeur au Collège militaire.

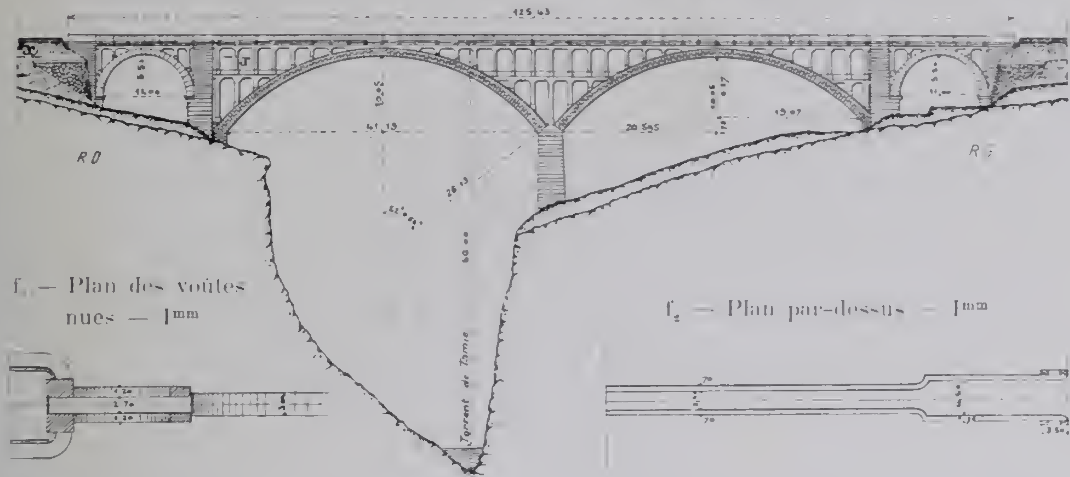
S_2. — Ce que j'ai vu, — juin 1908.

PONT SUR LE RUISSEAU DE TAMIÉ, PRÈS DE SEYTHENEX[1] (Hte-SAVOIE)

Chemin vicinal ordinaire

1908–1911 $\widehat{\mathrm{A}}^{n}\,r^{de}$ (> 40m)[2]

f_1 — Ensemble, aval — 1mm



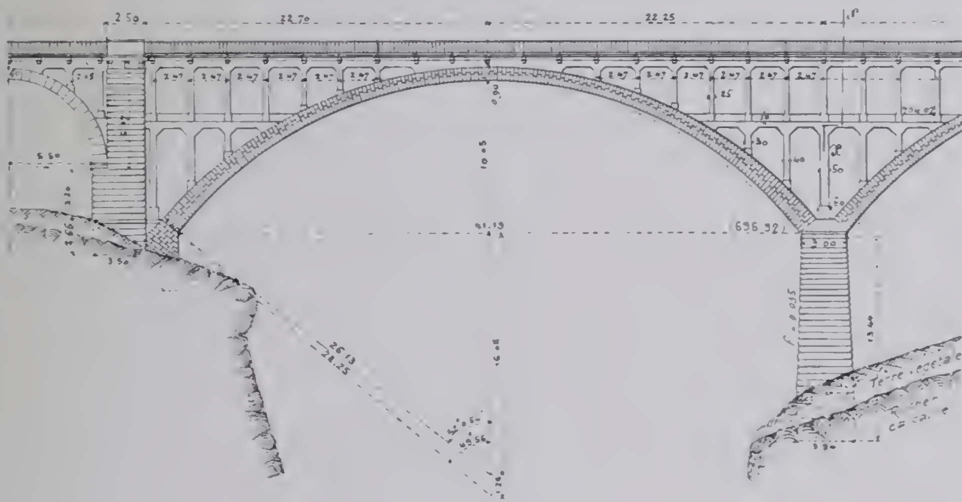
f_3 — Plan des voûtes nues — 1mm

f_2 — Plan par-dessus — 1mm

1. Pourquoi deux grandes arches ? — L'arche de 39m665, rive gauche, ne paraît pas imposée.

Peut-être aurait-on facilement ajusté aux lieux une grande voûte rampante au-dessus du creux, et un viaduc d'accès sur le glacis de rive gauche.

f_4 — Grande voûte rive droite — 2mm



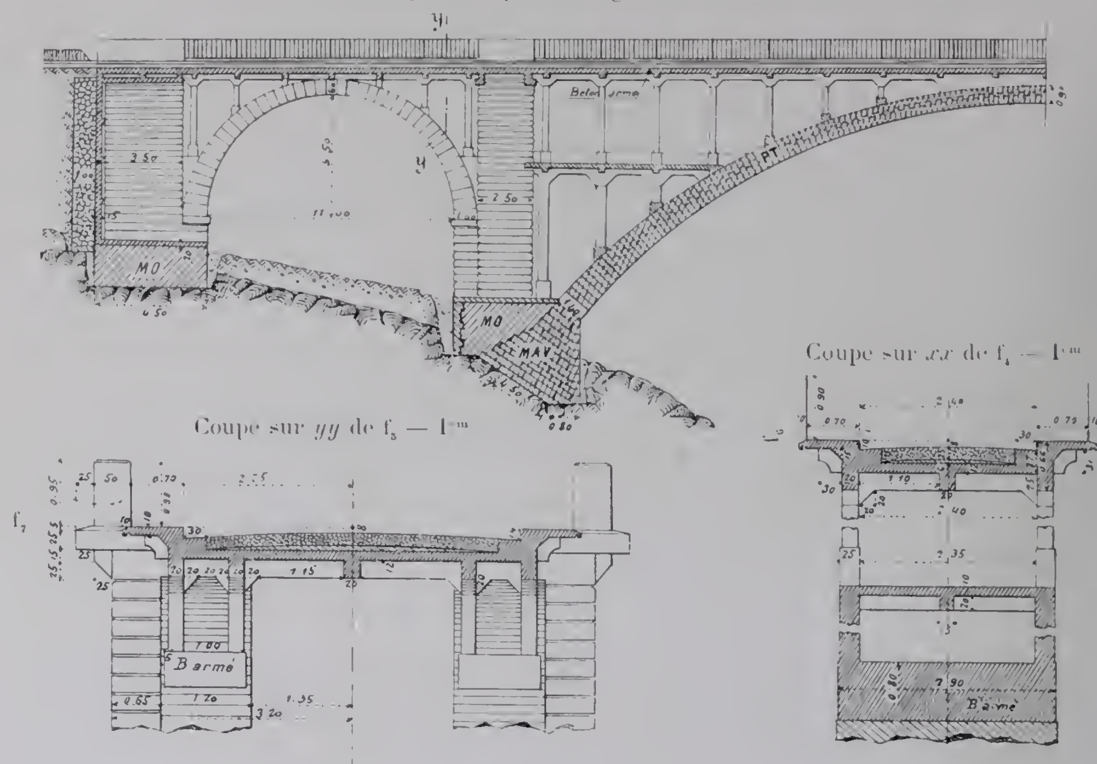
2. Arches d'accès en deux anneaux. — On a élargi à bon compte les entrées du pont, en plaçant un plancher en béton armé sur deux anneaux de voûte (f_3, f_7).

1. — À 4k de Faverges (station de la ligne d'Annecy à Albertville).

f_5 — Coupe en long — 3^mm

Coupe sur xx de f_4 — 1^cm

Coupe sur yy de f_5 — 1^cm



f_6

f_7

Pile 4^mm

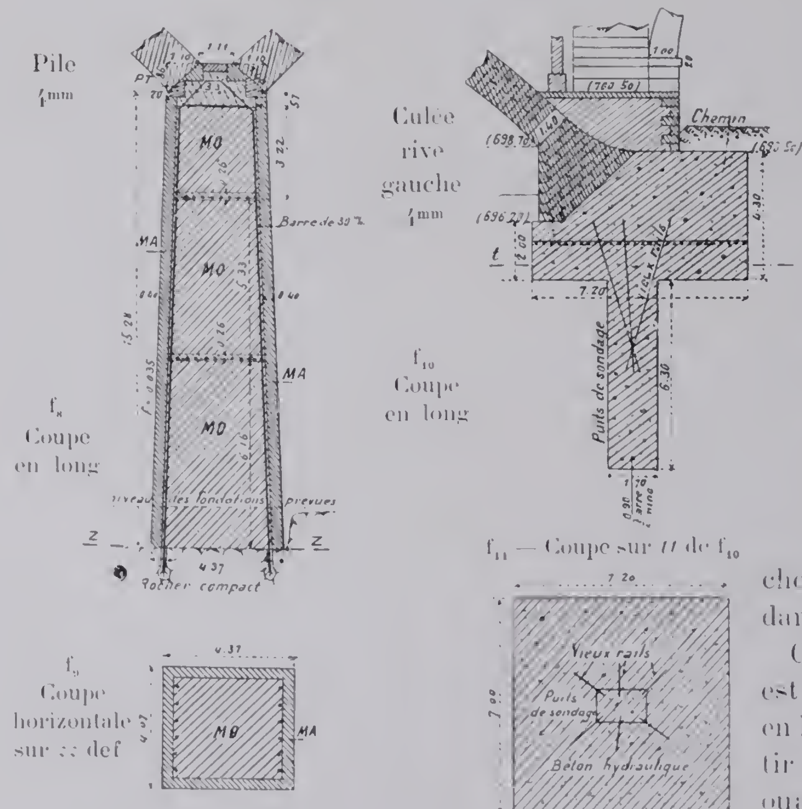
f_8 Coupe en long

Culée rive gauche 4^mm

f_10 Coupe en long

f_11 — Coupe sur tt de f_10

f_9 Coupe horizontale sur zz def



3. Matériaux

(S_1). — Sont : en béton armé : le tablier sous la chaussée, les colonnes qui le portent, le plancher entre les anneaux des arches d'accès (f_6, f_7) : en maçonnerie, le reste.

4. Pile et culées

(S''_1) (f_8, f_9). — La pile est armée : elle est ancrée dans des poches creusées à l'acide dans le rocher.

Comme les culées, elle est traversée par des dalles en béton armé pour répartir les pressions, prévenir ou arrêter les fissures (f_8, f_10).

5. Joints de dilatation

(S''_1). — Le tablier sous chaussée est coupé à 1^m 70 de chaque côté des clefs et à l'aplomb des naissances.

Φ_1^2 (S'''_1)

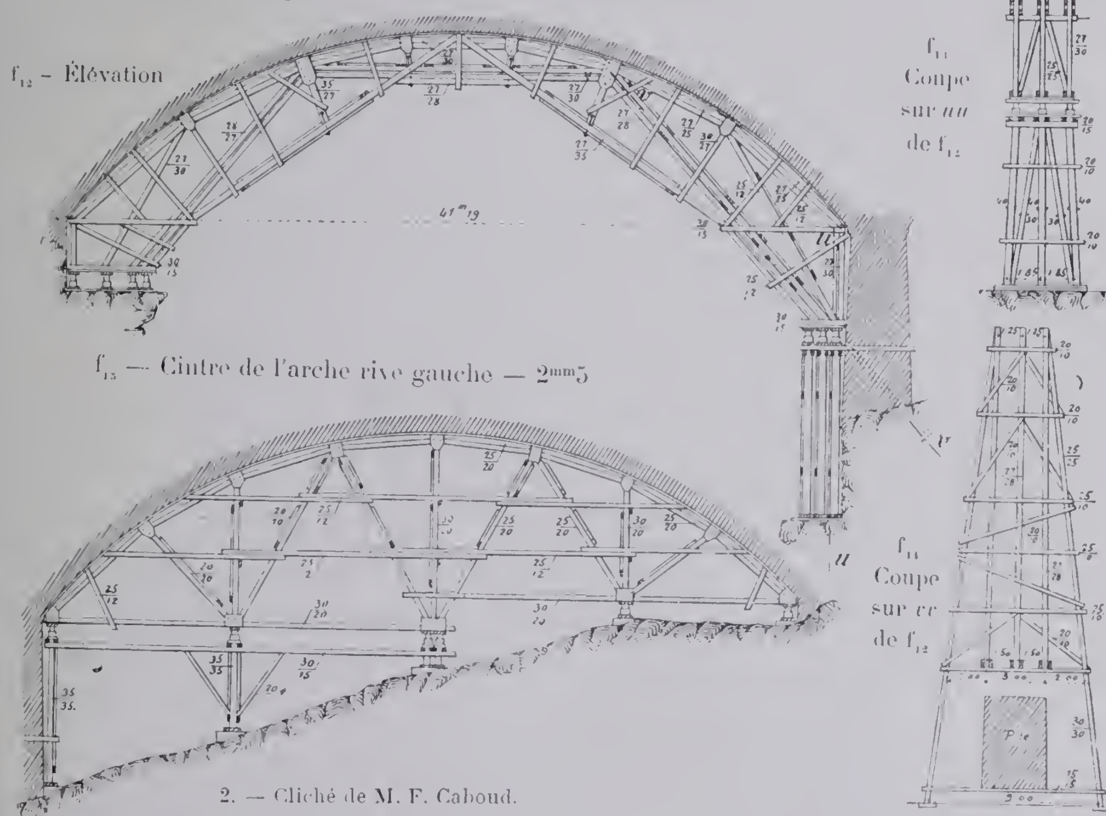


6. Fondation de la culée rive gauche (f_{10}, f_{11}). — Un sondage de 13m50 n'a pas atteint le rocher.

On a fondé sur un massif de béton de 8m × 7m30 × 3m50, armé dans les deux sens, de 54 barres de 25mm.

On a rempli le puits de sondage de béton, qu'on a relié au massif de fondation par 6 vieux rails.

7. Cintres (S'_2).



2. — Cliché de M. F. Caboud.

8. Décintrement (S''_1). — En matant les joints secs, on a exhaussé et décintré les voûtes. Aussi, pas de tassement au décintrement.

9. Dates (S''_1).

Commencement des travaux	septembre 1908
Fondations	octobre-novembre 1909
Grandes voûtes (construites en même temps)	2 avril 1910 - 15 novembre 1910
Décintrement	30 novembre 1911
Ouverture à la circulation	12 mars 1912

10. Quantités et Dépenses (S''_2).

1° Travaux à l'Entreprise.

	Quantités	Prix à l'unité *sans rabais*	Prix totaux *rabais de 2 % déduit*
Fouilles	$1032^{mc}75$	$1^{f}20$ à $5^{f}10$	$2565^{f}94$
Béton de fondation	$245^{mc}42$	20^{f}	$4810^{f}23$
Dalles armées, dans la pile et la culée rive gauche — Béton	$21^{mc}58$	50^{f}	$1057^{f}42$
Dalles armées, dans la pile et la culée rive gauche — Acier	$3291^{k}38$	$0^{f}50$	$1612^{f}78$
Cintres *(forfait)*	»	»	$17248^{f}00$
Pierres sèches	$313^{mc}44$	$6^{f}60$	$2027^{f}33$
Maçonnerie à mortier — Moellons ordinaires	$779^{mc}01$	$14^{f}10$	$10764^{f}36$
Maçonnerie à mortier — Moellons équarris	$37^{mc}37$	$23^{f}10$	$845^{f}98$
Maçonnerie à mortier — Moellons d'appareil	$270^{mc}09$	$23^{f}10$	$6114^{f}30$
Maçonnerie à mortier — Pierre de taille de Seythenex	$420^{mc}55$	70^{f}	$28849^{f}73$
Maçonnerie à mortier — Pierre de taille de Ruoms *(dés des garde-corps)*	$29^{mc}68$	100^{f}	$2908^{f}64$
Parements vus de maçonnerie — Moellons équarris	$158^{mq}34$	$1^{f}65$	$256^{f}03$
Parements vus de maçonnerie — Moellons d'appareil	$816^{mq}62$	$4^{f}40$	$3521^{f}27$
Parements vus de maçonnerie — Pierre de taille de Seythenex	$1219^{mq}85$	$7^{f}00$	$8368^{f}17$
Parements vus de maçonnerie — Pierre de taille de Ruoms	$126^{mq}84$	$8^{f}50$	$1056^{f}58$
Indemnités allouées			$7997^{f}00$
Plate-forme et piliers en béton armé (216^{mc}), garde-corps en fer, chaussée *(forfait)*			$30000^{f}00$
Total des travaux à l'Entreprise			$130003^{f}76$
2° Travaux en régie, indemnités de terrains, divers			$6339^{f}57$
Prix de revient total			$136343^{f}33$

11. Personnel (S''_1).

Projet : M. Schœndœrffer, Ingénieur en chef ; — M. Pernoud, Agent-Voyer Principal.

Direction des travaux : M. Schœndœrffer, puis M. Reuss, Ingénieurs en chef ; — M. Pernoud ; — M. Millet, Ingénieur ordinaire.

Entrepreneurs { Maçonnerie et Cintres : M. Mercier ;
Béton armé : MM. Mazet et Limousin.

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution (S'_1), renseignements (S''_1) et photographie (S'''_1) gracieusement communiqués par MM. Schœndœrffer et Reuss.

S_2. — Dessins du cintre (S'_2) et renseignements (S''_2) qu'a bien voulu m'adresser M. Pernoud.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ [1]

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES

SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

Série $\widehat{\mathbf{A}}^{n} F^{r}{}_{(\geqslant 40^{m})}$ [2]

Voir Préliminaires, Tome III, p. 3 et 4 :
1. — pour la définition des arcs « assez surbaissés »,
2 — pour le sens de ce symbole

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS CHEMIN DE FER

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* entre abouts des parapets Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets / *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	GRANDES VOÛTES — INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Retombées*	ÉPAISSEURS — TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg/$\overline{0^m01}^2$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEM[...] DES TYMPA[...] 2° *DÉCOR[...] DES TÊ[...]*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Canale** *Autriche* 1904–1906 $\widehat{\mathbf{A}}^n$ F^r (> 40^m)[1] *4 voûtes en arc : 3 de 40m à 1/5 ; 1 de 30m à 1/3,7.* *4 voûtes d'accès en plein cintre : 2 de 6m (rive droite) ; 2 de 8m (rive gauche).*	*212m 50* » 21m	5m 16 voie en courbe *5m 10* Fruit : 1/20 1m25	Arc de cercle **40m,00** *8m 00* $\frac{1}{5} = 0,20$ *29m 00*	**1m,40** *2m 10*	**1m,40** *2m 10*	L[1] Calcaire Bandeaux : bossages Douelle : taille plate *Ciment — 590k*	Pression maxima : 35k » 2700k/1m²	1° Au-d[...] de chaq[...] en riv[...] 7 vo[...] transv[...] vu[...] de 2[...] sur p[...] de 1[...]2[...] 2° »

1 — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, page II, n° 6.

A VOIE NORMALE **SÉRIE $\widehat{A}^n$ Fr (≥40m)**

TABLEAU SYNOPTIQUE

…DATIONS	EXÉCUTION — GRANDES VOÛTES — CINTRES — FERMES: Type / *Matière* / Appareils de decintrement	Nombre / *Épaisseur* / Écartement d'axe en axe / *Surhaussement*	Cube de bois / Poids de fer / Dépenses: Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT: État d'avancement du pont / *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* / Date	TASSEMENTS DE LA CLEF: sur cintre t_c / au décintrement t'_v / après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q / DÉPENSE D: Totaux et par unité de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
…re du sol / …fondeur / …l'étiage / …ssions …le sol / … 0m01² / …vérde / …9	11	12	13	14	15	16	17	18
	Voûte centrale						Voûte centrale :	$Q = 9\,200^{mc}$
…her / …aire	Retroussé	5	120mc	0mc39	2 rouleaux		$t_c = 40^{mm}$	$Q : S_p = 7^{mc}43$
		»	2400k	7k9				$Q : W = 0^{mc}53$
	»	1m28					$t'_v = 0$	
…ents… / …ns les / …eaux, / …t argile			18900f	61f9				
	Coins	*120mm*						

	Fondations	Élévation	Ensemble
D	97650f	487200f	584850f
$D : S_p$	78f1	389f3	467f4
$D : W$	5f7	28f3	34f0
$D : Q$	»	»	63f6

…le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\widehat{A}^n$ F^r (> 40m)

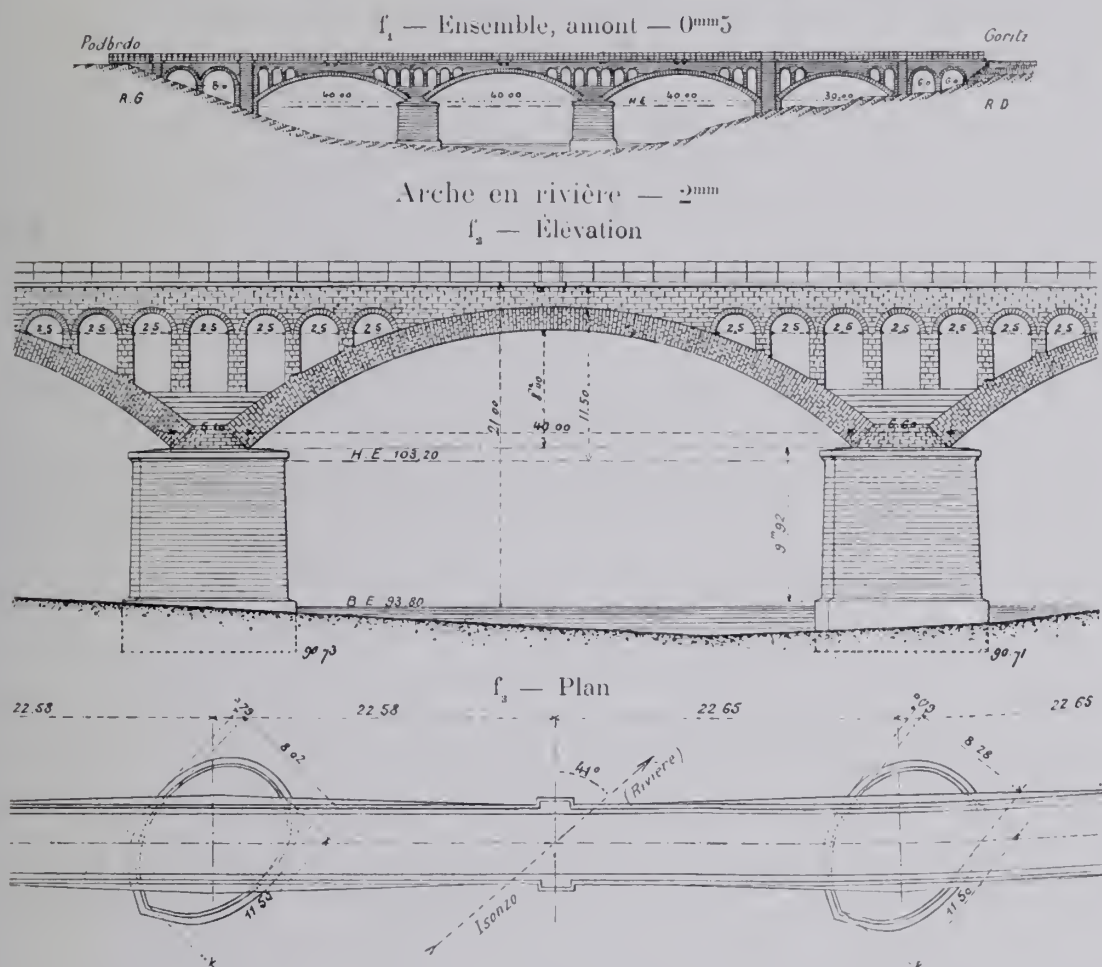
MONOGRAPHIES

PONT SUR L'ISONZO, PRÈS DE CANALE[1] *(AUTRICHE, - Kustenland)*

Ligne d'Assling (Carinthie) à Trieste, par Goritz[2] - Wocheinerbahn

1904-1906 $\widehat{A}^n$ F^r (> 40m) 1

f_1 — Ensemble, amont — 0mm5



Arche en rivière — 2mm

f_2 — Élévation

f_3 — Plan

1. Piles biaises. — Le pont est droit sur piles à section ovale (f_3) orientée suivant le courant des crues, là, très violentes (S_1).

1. — à 1k environ en amont de la station de Canale.

2. — en allemand : *Gorz*.

2. Aspect (S_3). — Ces grosses tours qui engoncent les retombées, on les accepte, à la réflexion, sans trop de difficulté.

On voit trop de tympan au-dessus des clefs.

Les refuges ne paraissent pas à leur place aux clefs des voûtes de 40m.

Les pilastres de la voûte de 30m ne portent rien.

Φ₁ — Les 3 arches de 40m (S_1)



3. Matériaux (S_3). — L'ouvrage est, comme il convient, simplement traité.

Les tympans et les pilastres sont en moellons grossièrement équarris à assises horizontales inégales.

Les piles sont parementées en gros libages.

4. Exécution des grandes voûtes. — Après clavage du premier rouleau, on exécuta le deuxième en partant des retombées et de la clef. « *Cette* « *méthode se montra excellente* » (S'_1).

5. Dates (S'_1).

Commencement des travaux	mars 1904
Fondations	juillet — septembre 1904
Voûte centrale	11 mai — 5 juin 1905
Décintrement	9 août 1905
Ouverture à la circulation	juillet 1906

Φ_2 — Cintres (S''_1)



6. Personnel (S'_1).

Projet et Direction des Travaux : M. l'Ingénieur Pabo Yelić « Baukommissär ».

Entrepreneurs : MM. Sard, Lenassi et Cie.

SOURCES :

S_1. — Renseignements (S'_1) et photographies (S''_1) gracieusement donnés par le Ministère des Chemins de fer à Vienne.

S_2. — Geschichte der Eisenbahnen des œsterreich-ungarischen Monarchie, - VI Band. - 1898-1908, II Band, « *Der Brückenbau der neuen Alpenbahnen. — A. Steinbrücken.* » Josef Zuffer, p. 74 a 87.

S_3. — Ce que j'ai vu — octobre 1908.

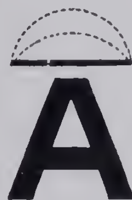
S_4. — Le Génie Civil, 2 mai 1908 : « *Les nouvelles lignes de chemins de fer dans les Alpes* « *autrichiennes* ». F. Hofer, p. 1 à 6, Pl. I.

Les dessins sont réduits de S_2

VOÛTES INARTICULÉES

EN

ARC TRÈS SURBAISSÉ [1]



Voir Préliminaires, Tome III, p. 3 et 4 :
1. pour la définition des arcs « très surbaissés »,
2. pour le sens de ce symbole

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ [1]

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS ROUTE

Série $\overset{\frown}{\mathbf{A}}^{1}\,r^{te}_{(\geqslant 40^{m})}$ [2]

Voir Préliminaires, Tome III, p. 3 et 4

1. — pour la définition des arcs « très surbaissés »,

2. — pour le sens de ce symbole

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

PONT	PROJET							
	ENSEMBLE		GRANDE VOÛTE					
PONT Date Symbole	*Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS CORPS Clef *Retombées*	TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg $\overline{0^m01}^2$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMEN[T] DES TYMPAN[S] 2° *DÉCORAT[ION] DES TÊT[ES]*
1	2	3	4	5	6	7	8	[9]
Mosca à Turin *Italie* 1834 **Ā**[1] r^te^ (> 40m) 1	*91m* » 7m	12m18 » Pas de fruit »	Arc de cercle **45m,00** *5m 50* $\frac{1}{8,182} = 0.122$ *48m 773*	**1m,50** *2m,50*	**1m,50** »	PT [1] Granit *Chaux grasse de Palazzolo — 150*		1° » 2° *Voussu[res] en corne de r[...]*
de **Teinach** *Allemagne* 1882 **Ā**[1] r^te^ (> 40m) 2	*43m* 5mm 5mm 6m60	6m 20 *5m 60* Pas de fruit »	Au-dessus du sol, Arc de cercle **33m,00** *3m 30* $\frac{1}{10} = 0,10$ *42m 927* Sur le sol de fondation, Portée : **46m,00**	**1m,00** *1m,60* *à 22° 36' 17"*	**1m,00** *1m 60*	Au-dessus du sol : PT [1] Épaisseur [illegible] à 60' 10 tirants de 60mm × 10mm Grès à 300k *Ciment Portland 1000k* *A la clef et aux retombées : 1500k*	Pression maxima : Clef : 29k3 Retombées : 27k5 Sur le béton de fondation : 11k *Méry* 400k mq	1° 3 vout[es] longitu[dinales] en plein c[intre] de 1m [...] sur [...] de 0m50 Barres [...] entre ty[mpans] 2° »
de **Huzenbach** *Allemagne* 1889 **Ā**[1] r^te^ (> 40m) 3	*35m 75* 30mm 30mm 6m50 étiage	3m80 *3m 00* *entre bandeaux* Pas de fruit »	Aux retombées sur le béton : **35m,00** *4m 70* $\frac{1}{7,44} = 0.134$ Sur le sol de fondation. Portée : **41m,30**	**0m,60** *0m,95*	**0m,60** *0m 88*	PT [1] grossière Grès	Pression maxima : Clef : 40k Retombées : 52k *Méry*	1° P[as] d'évid[ement] 2°
de **Wengern** *Allemagne* 1904 **Ā**[1] r^te^ (> 40m) 4	» 40mm 40mm 7m	7m,00 *5m 50* Pas de fruit 0m35	Arc d'anse de panier **50m,00** *5m 50* $\frac{1}{9,10} = 0.11$	**1m,20** *2m,00*	**1m,20** *2m 00*	Voûte en petits moellons Aux têtes, crépi simulant de grandes PT [1] *Ciment — 0mc 333*	Pression à la clef : 20k	1° 2 vid[es] longitud[inaux] de 1m[...] Mur entr[e] de 0m5[...] Dess[us] une plat[e] [...] en béton [...] 2°

1. Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III p. II, n° 6

SÉRIE A̿¹ r^le (> 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE

…NDATIONS …re du sol …fondeur … l'étiage …essions …r le sol ≤ 0m01² …ocrde	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité de surface utile S_p [3], de volume « utile » W [4]
1…	11	12	13	14	15	16	17	18
…s	Retroussé soutenu au milieu » Coins	10 » » *261mm*			A pleine épaisseur Voussoirs posés à sec Lames de plomb : aux reins, à l'intrados ; au cerveau, à l'extrados ; ailleurs, coins en fer.	» *Décintrement commencé 20 jours après le clavage* »	t'_v (après 5 jours) 153mm t''_v (après 4 mois sous charge de 3000 T) = 41mm y compris l'enfoncement des culées	D = 1 348 552f (Pont et abords) $D : S_p$ = 1216f7 D : W = 137f5
Grès … RD …essi n …xtina … 5k … 5.5 *…ements*	Fixe réemployé en 1886, au Pont de Marbach A̿¹ r^le (< 40m) [2] Tome IV Montants et contrefiches » Boîtes à sable	5 *2,5cm* »			A pleine épaisseur 3 joints secs [1] aux retombées Voûte clavée en même temps à la clef et aux retombées	Voûte nue *12 jours* »	t_c 10mm t'_v 43mm t''_v après 42 j. 24mm t''_v après 90 j. 17mm $t'_v + t''_v$ = 84mm	Fondations / Élévation / Ensemble D [1]: 22212f / 30850f / 53062f $D : S_p$: 83f3 / 115f7 / 199f0 D : W: 14f6 / 20f3 / 34f9 1. — Non compris la surveillance.
…sses …ssion …x m… 485	Retroussé sur 10m » »		» » 1641f	» » 15f8		» *23 jours*	t'_v 60mm t''_v 20mm $t'_v + t''_v$ 80mm	Fondations / Élévation / Ensemble D: 1740f / 9983f / 11723f $D : S_p$: 12f8 / 73f5 / 86f3 D : W: 2f0 / 11f3 / 13f3
… …ssion . 3k *Béton,* *de rails.* *…tois*								

…le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — A. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — B.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

PONT Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* entre abouts des parapets Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets / *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	GRANDE VOÛTE — INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Retombées*	ÉPAISSEURS — TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg $\overline{0^m01}^2$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEM[ENTS] DES TYMPA[NS] 2° *DÉCORA[TION] DES TÊ[TES]*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Ziegenhals** *Allemagne* 1905 Ā[1] 1re (⩾ 40m)[5]	» 40mm 40mm 5m50	» » » 0m35	Arc d'anse de panier à 3 centres **40m,00** *4m20* $\frac{1}{9,52} = 0,105$ *Rayons :* *Cerveau : 60m* *Reins : 25m676*	0m,85 *1m70*	0m,85 *1m70*	Voûte en petits moellons Aux têtes, crépi simulant de grandes PT[1] *Ciment — 0mc333*		1° Pas d'évidem[ents] 2°
de **Michelau** *Allemagne* 1905-1906 Ā[1] 1re (⩾ 40m)[6]	*55m60* 50mm 50mm 6m70	3m00 *1m60* Pas de fruit 0m40	Arc d'anse de panier à 3 centres **42m,00** *5m20* $\frac{1}{8,07} = 0,124$ *Rayons :* *Cerveau : 50m* *Reins : 26m637*	0m,80 *1m30*	0m,80 *1m30*	Comme au Pont de Ziegenhals Ā[1] Pte (⩾ 40m)[5] Le crépi des têtes est à 1 de ciment, 4 de sable	Pression maxima : sans surch. / avec surch. Clef : 18k6 / 22k Joint de rupt. : 25k1 / 29k4 Retombées : 13k / 15k3 Surcharge : 600k 1mq	1° 2 vo[ûtes] transver[sales] vues, en plein [cintre] de 3m8[0] 2°
de **Neuhammer** *Allemagne* Projet : 1905 Ā[1] 1re (⩾ 40m)[7]	*109m70* » »	6m00 *6m00* » 0m35	Arc d'anse de panier à 3 centres **52m,00** *6m00* $\frac{1}{8,7} = 0,115$	1m,05 *1m80*	1m,05 *1m80*	Comme au Pont de Ziegenhals Ā[1] Pte (⩾ 40m)[5] La douelle est enduite de ciment		1° Pas d'évidem[ents] 2°
de **Schwusen** *Allemagne* 1907 Ā[1] 1re (⩾ 40m)[8]	*72m00* 25mm 25mm 8m50 (sol)	5m00 *1m60* Pas de fruit 0m40	Arc d'anse de panier à 3 centres **48m,00** *5m75* $\frac{1}{8,347} = 0,119$ *Rayons :* *Cerveau : 60m* *Reins : 40m*	0m,90 *1m30*	0m,90 *1m30*	Comme au Pont de Ziegenhals Ā[1] Pte (⩾ 40m)[5]		1° 2 voû[tes] transver[sales] vues, en plein [cintre] 2°

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

SÉRIE $\bar{A}^1$ r^{le} ($\geqslant 40^m$)

TABLEAU SYNOPTIQUE (*Suite*)

…DATIONS …re du sol …fondeur …l'étiage …ssions …le sol …0^m01^2 …océdé	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES: Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité de surface utile S_p [3], de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
…tion, …de rais …lotis								
…ssion …xima …urcharge …589 …urcharge …84	Fixe Montants et contrefiches .	6 » à partir des têtes 0^m95 0^m85 0^m80 ..				» *11 jours* 6 juillet		$Q = 675^{mc}$ $Q : S_p = 2^{mc}43$ $Q : W = 0^{mc}39$
…ier …ion . 3s								
…lotis …ert cona et …inclinés	Fixe Montants et contrefiches » .	7 » à partir des têtes 0^m85 0^m70 0^m65 »						

	Fondations	Élévation	Ensemble
D	14314^f	26408^f	40722^f
$D : S_p$	51^f5	95^f0	146^f5
$D : W$	8^f2	15^f4	23^f6
$D : Q$	»	»	60^f4

…e calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A* 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

PONT Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	GRANDE VOÛTE — INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Retombées*	ÉPAISSEURS — TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1 mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg $\overline{0^m01}^2$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEM[...] DES TYMP[...] 2° *DÉCORA[...]* *DES T[...]*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Kupferhammer** *Allemagne* 1907 $\overline{A}$[1] r^{te} (> 40^m) 9	» 33^{mm} 33^{mm} 7^{m}19 étiage	» » » 0^{m}45	48^m,00 *5^{m}75* $\frac{1}{8,347}$ = 0,119	0^m,90 *1^m,30*		Comme au Pont de Ziegenhals $\overline{A}$[1] r^{te} (> 40^m) 5	Pression maxima : Clef / Retombées sans surcharge : 21^{k}1 / 17^{k}2 avec surcharge complète : 24^{k}5 / 19^{k}7 sur une 1/2 voûte : 33^{k}8 *Courbe de pression par le milieu de la clef et des retombées* 400^k m^2 Rouleau de 15^T	1° 2 vo[...] transv[...] vue en plei[...] 2°

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

SÉRIE $\bar{A}^1$ 1re (⩾ 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE *(Suite)*

ONDATIONS — *ture du sol* — rofondeur s l'étiage — Pressions sur le sol kg 0m01² — *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES — Type — *Matière* — Appareils de décintrement	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES — Nombre — *Épaisseur* — Écartement d'axe en axe — *Surhaussement*	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — Cube de bois — Poids de fer — Dépenses — Totaux	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — Cube de bois — Poids de fer — Dépenses — par mq de douelle [2]	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — MODE DE CONSTRUCTION	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — DÉCINTREMENT — État d'avancement du pont — *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* — Date	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — TASSEMENTS DE LA CLEF — sur cintre t_c — au décintrement t'_v — après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q — DÉPENSE D — Totaux et par unité de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Pilotis verticaux et inclinés.								

ur le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\bar{A}^1$ r^{te} ($\geq$ 40m)

MONOGRAPHIES

PONT MOSCA, SUR LA DORA RIPARIA, A TURIN

via Ponte Mosca

1834 (S_2) $\bar{A}^1$ r^{te} ($\geq$ 40m) I

Φ_1 (S.)



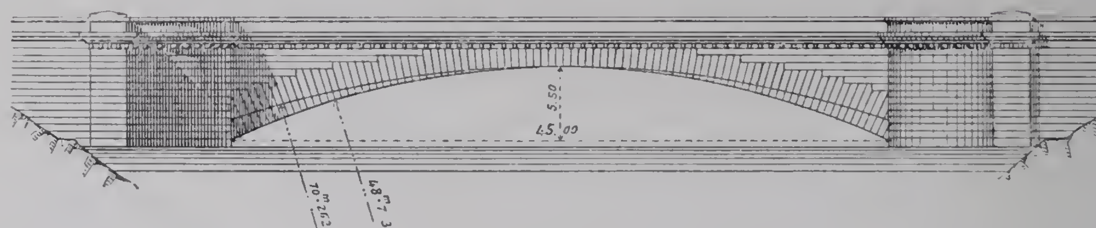
1. Le pont Mosca est imité du « *Pont d'une arche de 150 pieds « d'ouverture, projeté* (par Perronet) *pour être construit sur chacun « des deux bras de la Seine à Melun* » [1]. — Le projet de Perronet comportait, comme le pont Mosca, une arche unique en arc sur l'axe, avec cornes de vache aux têtes, bandeaux à crossettes sans saillie sur les tympans. C'est bien le même pont.

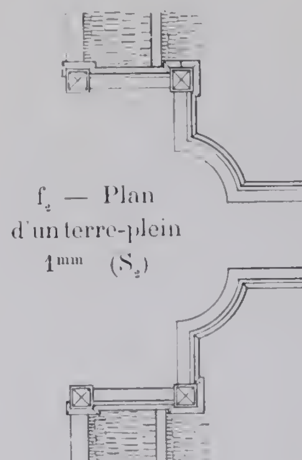
1. — Perronet : « *Description des projets et de la construction des Ponts de Neuilly, de Mantes, « d'Orleans, et autres* », Tome second, Paris, Imprimerie Royale MDCCLXXXII, p. 31, 32, 33, Pl. XLIV.

Voici, comparées, les principales dimensions des deux projets :

			Projet de Perronet	Pont Mosca
Portée			150 Pieds = 48m726	45m
Intrados	Rayon	de la voûte	200 Pieds = 64m968	48m773
		de la corne de vache	300 Pieds = 97m452	70m262
	Surbaissement	de la voûte	1/10,2	1/8,2
		de la corne de vache	1/15,7	1/12,2
Épaisseur à la clef			5 Pieds = 1m624	1m50
Largeur	entre têtes		39 Pieds = 12m668	
	entre parapets			12m18 (S_2)

f_1 — Élévation — 2mm (S_2)





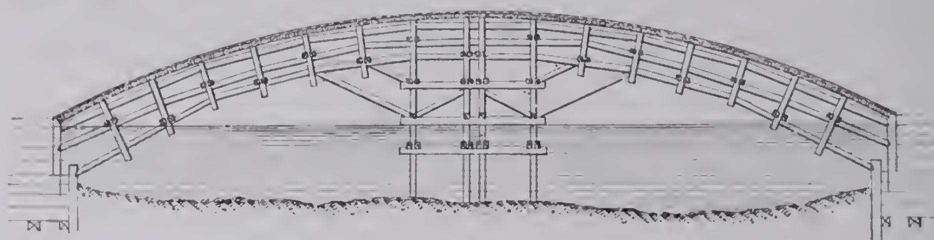
f_2 — Plan d'un terre-plein 1mm (S_2)

Les culées, beaucoup plus larges que le corps central, s'y raccordent :

au Pont de Perronet, par de courtes courbes concaves ;

au Pont Mosca, par deux tours rondes convexes (f_2), comme au Vieux Pont de Lavaur [2].

f_3 — Cintre — 2mm5 (S_2)



2. Cintre. — C'est à peu près exactement le projet de Perronet pour Melun [3]. Les appuis au cerveau ne devaient servir qu'en cas de besoin. « *L'apla-*

2. — E^1 rte ($\geqslant$ 40m)2 — Tome I.

3. — Perronet. *Loc. cit. renvoi 1.* Pl. XLIV.

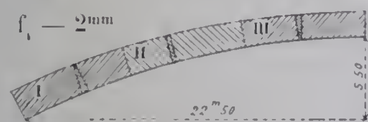
« *tissement de la grande voûte exigera d'en soutenir le cintre..... avec trois files*
« *de forts pieux dans leur milieu..... : le dessous du milieu de chaque ferme de*
« *cintre sera disposé de manière qu'elle soit isolée à 2 pieds de distance de ce point*
« *d'appui, pour n'y avoir recours que lorsqu'on le trouvera convenable pendant*
« *la construction de la voûte. Cet intervalle de 2 pieds sera garni de pièces de*
« *charpente, taillées en forme de coins, qui serviront, en les ôtant lors du décin-*
« *trement, à faciliter le dérètissement des couchis.* »[4]

On mit 45 jours à tailler et monter les fermes.

3. Fondations. — Cette grande voûte très plate a été fondée sur pilotis, comme Perronet l'avait prévu pour son pont de Melun[5]. C'était hardi.

4. Exécution de la voûte. — Deux maçons seulement, servis par quelques manœuvres, posèrent en 75 jours, sans aucun accident, les 651 voussoirs de la voûte : ils pesaient de 5 à 8 tonnes, sauf ceux de la première assise des naissances, qui pesaient de 15 à 18 tonnes.

Comme au pont de Nemours[6], on tint les joints plus larges là où, d'après les expériences de Perronet et de Boistard, on craignait les écrasements, c'est-à-dire à l'intrados des reins, à l'extrados du cerveau.



Considérons 3 tronçons (f_1). Dans le tronçon I voisin des naissances, les joints étaient plus larges à l'intrados qu'à l'extrados ; dans le tronçon II, ils étaient égaux ; dans le tronçon III, ils étaient plus minces à l'intrados.

Les épaisseurs des joints dans les tronçons I et III variaient suivant une certaine progression.

Les intervalles entre les assises étaient maintenus aux reins de l'intrados et au sommet de l'extrados par des lames de plomb ; dans le corps de la voûte, par des coins en fer.

Les voussoirs des assises des naissances étaient liés par des crampons en fer.

Tous les voussoirs étant en place, sur cales, les joints vides furent remplis avec du mortier de chaux et de sable propre en parties égales, retenu en douelle par de l'étoupe.

Puis, on retira les coins en fer.

5. Décintrement. — Au moment de décintrer, on dégrada sur 3cm tous les joints d'intrados et d'extrados.

6. Durée d'exécution. — 4 ans.

4. — Perronet. *Loc. cit., renvoi 1*, p. 31, in fine.

5. — id. Pl. XLIV.

6. — Projeté par Perronet en 1771, puis modifié. Construit par Boistard, de 1795 à 1804. — Arcs de 16m25 au 1/15,3.

7. Dépense. — Pont et abords...................... 1.348.552f37 [7, 8]

8. Ingénieur. — Mosca [9].

7. — « *Sulle Cause che produssero la ruina del ponte in muratura sul Liri* », Conferenza dell' Ingegnere Pasquale Sasso, — Naples, 1880.
Morandière (S_2) donne 1.400.000f.

8. — Il était estimé 710.000 lires dans un devis signé le 10 janvier 1823 par C. Mosca « Capitano Ingegnere di 1a classe di Ponti e Strade ». « *Capitoli d'appalto per la costruzione d'un ponte ad un sol arco sulla Dora Riparia presso Torino* ». Turin, Imprimerie royale, 1823. (Bibliothèque de l'École des Ponts et Chaussées. Fonds italien. N° 587).

9. — Il est porté comme Élève de notre École des Ponts et Chaussées, aux Annuaires de 1811-1812 (3e classe), 1813 (1re).

SOURCES :

S_1. — Transactions of the Institution of Civil Engineers. - volume I. 1836, p. 183 et suivantes : « *Details of the construction of a Stone Bridge erected over the Dora Riparia near* « *Turin* » by chevalier Mosca, — M. Albano, A. Inst. C. E.

S_2. — Morandière, Construction des Ponts, p. 302, Pl. 61, fig. 8 à 11 ; Pl. 136, fig. 7 : « *Pont de Turin, sur la Dora* ».

S_3. — Ce que j'ai vu — octobre 1903.

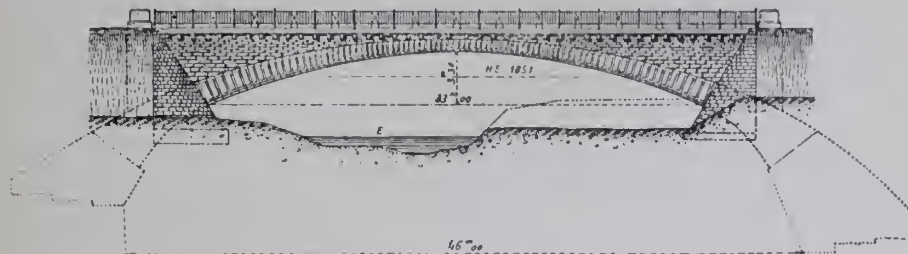
Tout ce qui n'est pas spécifié S_2 ou S_3 est de S_1.

PONT SUR LA NAGOLD, A TEINACH[1] (ALLEMAGNE, - Wurtemberg)

Route de Nagold à Calw

1882 $\bar{A}^1$ r[te] (≥ 40m) 2

f₁ — Élévation — 2mm



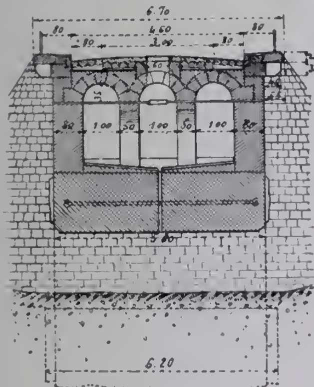
1. Grande voûte. — C'est la première grande voûte du Wurtemberg (S_2). On l'a faite par économie[2] et pour faciliter le flottage.

Les dimensions en ont été fixées « *d'après les principes appliqués en France* « *pour de grands ponts récents* ».[3]

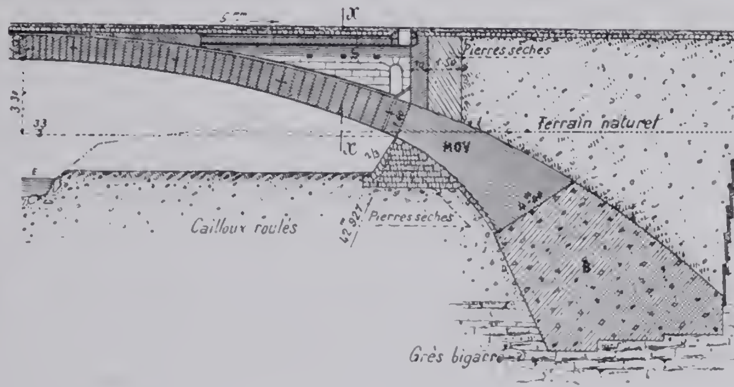
2. Chaussée. Trottoirs. — La chaussée est empierrée. Ses pentes de 5mm écoulent mal les eaux.

Les trottoirs, asphaltés, sont en porte-à-faux de 0m55 sur consoles ancrées dans les tympans.

f₃ — Coupe en travers sur *xx* de f₂ — 5mm



f₂ — Coupe en long — 3mm



1. — Près de la gare, — Ligne de Pforzheim à Horb, à 30k de Pforzheim.

2. — On avait estimé (S_1) :

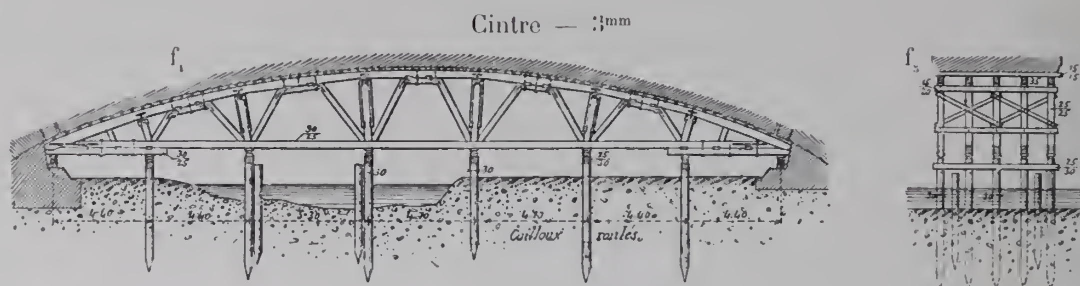
3 anses de panier de 11m40, 12m40, 11m40	63.000 Mark.
3 arcs de cercle de mêmes portées	60.000
2 arcs de cercle de 17m	55.000
1 arc de cercle de 33m à culées verticales	53.000
1 arc de cercle de 33m à culées perdues	46.000

3. — « *Die Bemessung der Querschnittsdimensionen des Brückenbogens erfolgte nach den Grundsätzen* « *welche neuerdings bei grossen Brücken in Frankreich in Uebung gekommen sind.* » (S_1).

3. Chape. — Sous la chaussée, enduit lissé de ciment, puis feutre asphalté de 7^{mm}, puis 10^{cm} de sable ; sous les évidements, chape en ciment.

La voûte n'a pas été traversée par l'eau.

Cintre — 3^{mm}



4. Cintre. — Les bois travaillaient au plus à 30^k ; on plaçait une feuille de plomb aux abouts des pièces fatiguées.

Pas de platelage : chaque assise était posée sur un couchis.

Les boîtes à sable, en fonte, à section carrée de 25/25, étaient reliées électriquement à la chambre du gardien.

Le sable était lavé, séché, et garanti de la pluie par une tôle.

5. Fondations. — On posa dans le béton 1/3 de grosses pierres, par assises normales à la courbe de pression.

Après 1 jour à l'air et 6 jours à l'eau, le mortier à 1/3 devait résister à une tension, par 0^{m}01^2, de 4^k (ciment prompt) [4], 5^k (ciment lent) [4].

La maçonnerie de moellons ordinaires lités, au-dessus du béton (f_2), fut faite au mortier de ciment à 1/3 en bas, 1/1 en haut, par assises normales à la courbe de pression.

Quand on fut arrivé aux retombées de la voûte, on s'arrêta pour laisser durcir le béton.

6. Exécution de la voûte. — On déposa tous les voussoirs près de leur place définitive. Les pistons des boîtes à sable s'enfoncèrent de 10^{mm}.

Avant de poser une assise, on vérifiait l'emplacement de son couchis.

On posa aux retombées 3 assises à sec [5] : à l'extrados, sur lattes de peuplier tendre de 1^{cm} d'épaisseur et 40^{cm} de long ; à l'intrados, sur des cordes de chanvre entourées de caoutchouc, de 16^{mm} d'épaisseur, à 15^{cm} de la douelle.

Le caoutchouc employé se comprima trop : le joint se réduisit à l'intrados à 5^{mm}, au lieu des 10^{mm} prévus.

On posa les voussoirs à sec, assise par assise, en garnissant d'étoupe les joints par lesquels le mortier aurait pu s'échapper. On mouillait les joints et on versait du mortier très fluide qu'on fichait ensuite ; puis, une heure après, on enlevait l'étoupe.

4. — Stuttgarter Cementfabrik — Blaubeuren.

5. — « *comme au pont de Claix* » (S_4) $\widehat{A}^1$ 1te (⩾ 40^m)5 — Tome III.

On a regretté de n'avoir pas donné aux joints 15^{mm} au lieu de 10^{mm}.

On coula du mortier en même temps aux assises de clef et aux joints secs des retombées.

On avait constaté que le cintre, mouillé par les pluies, s'était élevé de 15^{mm} à la clef : un peu avant de claver, on en arrosa copieusement le sommet.

7. Décintrement. — Il fut opéré par 20 hommes.

Les boîtes à sable n'avaient qu'un orifice : deux se rompirent.

8. Fissures et tassements. — De légères fissures apparurent à l'extrados de la retombée rive droite[6]. Elles disparurent 6 semaines après, l'ouvrage achevé.

La voûte a tassé :

au décintrement (voûte nue), de.................... 43^{mm}.

à l'achèvement de l'ouvrage, de.................... 67^{mm}.

Au bout de 3 mois, le tassement atteignit son maximum.. 84^{mm}.

On ne constata aucune nouvelle fissure pendant 5 mois.

D'après les calculs basés sur les expériences de Bauschinger, la contraction de l'arc devait être 34^{mm}, le tassement de la clef, 22^{mm}.[7]

Il est possible que les poches d'argile sableuse, que contient le rocher de fondation, se soient détrempées et aient tassé sous le poids de la voûte.

9. Durée d'exécution.

	en semaines
Fouilles et bétonnage (travail de nuit avec des torches à l'huile minérale).	7
Maçonnerie de moellons ordinaires lités, en fondation, sur le béton (f_2)...	3
Grande voûte en pierre de taille..................................	3
Maçonneries au-dessus de la voûte..................................	6

10. Personnel. — *Projet et Direction des Travaux :* M. Leibbrand, « Oberbaurat » à Stuttgart.

Direction locale : M. Paul Braun « Baumeister » à Calw.

6. — C'est pour les éviter, qu'en Wurtemberg on articulera désormais les grandes voûtes (S_2).

7. — La contraction en microns μ par mètre pour le grès de Bavière est de :
150 μ, sous 10^k ; - 300 μ, sous 20^k ; - 370 μ, sous 30^k ; - 450 μ, sous 40^k.

SOURCES :

S_1. — Zeitschrift für Baukunde, 1883. Heft 6. p. 347 à 356, Pl. 26 : « *Steinbrücke über die « Nagold bei Teinach (Württemberg)* », Stuttgart, im juni 1883, Leibbrand.

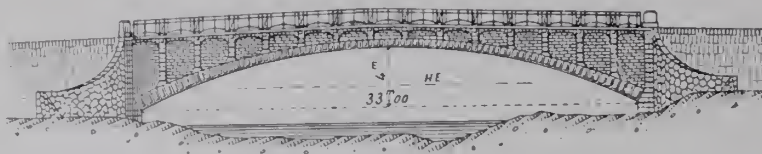
S_2. — Zeitschrift für Bauwesen 1888, p. 235 à 260, Pl. 38 et 40 : « *Steinbrücken mit gelenk- « artigen Einlagen* », — Stuttgart, novembre 1887, Leibbrand, - Kgl. Ober-Baurath.

Tout ce qui n'est pas spécifié S_2 est de S_1.

PONT SUR LA MURG, A HUZENBACH[1] (*ALLEMAGNE, - Wurtemberg*)

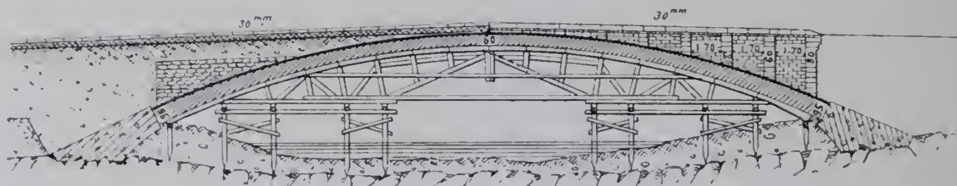
1889 — $\overline{A}^1$ r^te (> 40m)3

f_1 — Élévation — 2mm



f_2 — Cintre et demi-coupes en long — 2mm5 (S''_1)

sur l'axe | en avant du tympan



1. — à 10k environ en aval de Baiersbronn.

SOURCES

S_1. — Fortschritte der Ingenieurwissenschaften. - Zweite Gruppe. 7 Heft : « *Gewölbte* « *Brücken* », von Karl von Leibbrand. Präsident der K. Württ. Ministerial-Abteilung für den Strassen-und Wasserbau.

S'_1 — Tableaux statistiques, p. 22.

S''_1. — Dessins, Pl. I, fig. 35 à 39.

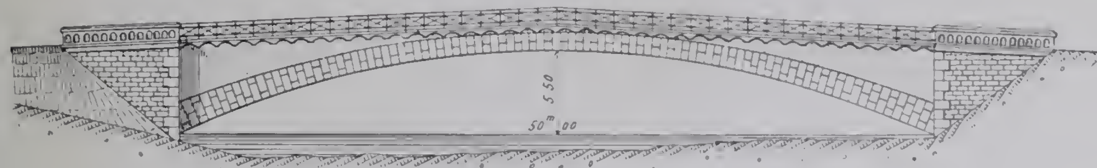
PONT SUR LA MALAPANE, A WENGERN

(ALLEMAGNE, – Silésie, – Cercle d'Oppeln)

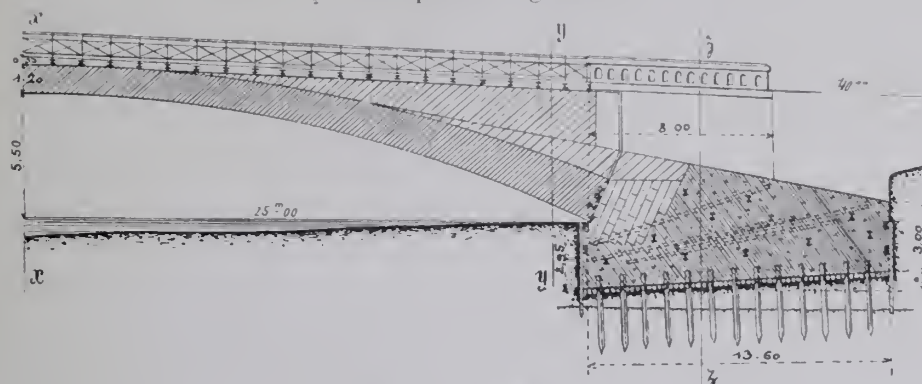
Route d'Oppeln à Yellowa

1904 (S_1) **A**[1] r[te] 40m 4

f_1 — Élevation — 2mm

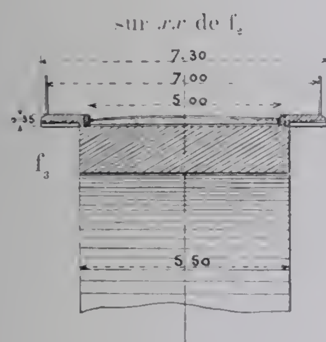


f_2 — Coupe en long — 3mm

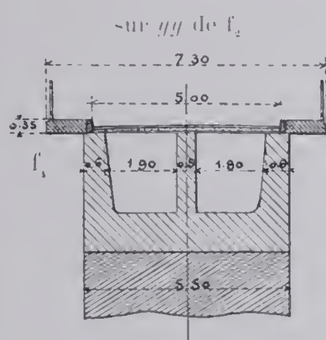


Coupes en travers — 5mm

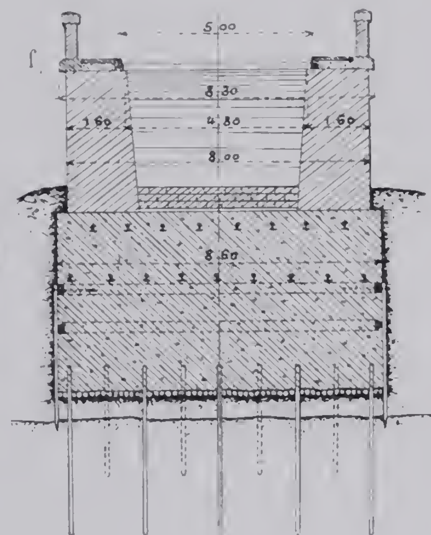
sur *xx* de f_2



sur *yy* de f_2



sur *zz* de f_2



1. Personnel. — *Projet et Entreprise :* MM. Liebold et Cie, de Langebrück (Saxe).

SOURCE :

S_1. — Dessins d'exécution qu'ont bien voulu me remettre MM. Liebold, en 1908.

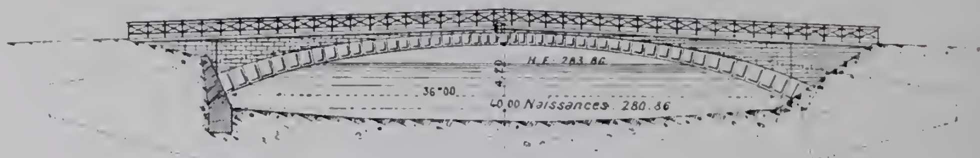
PONT SUR LA FREIWALDAUER BIELE, A ZIEGENHALS

(*ALLEMAGNE*, - *Silésie*, - *Cercle de Neisse*)

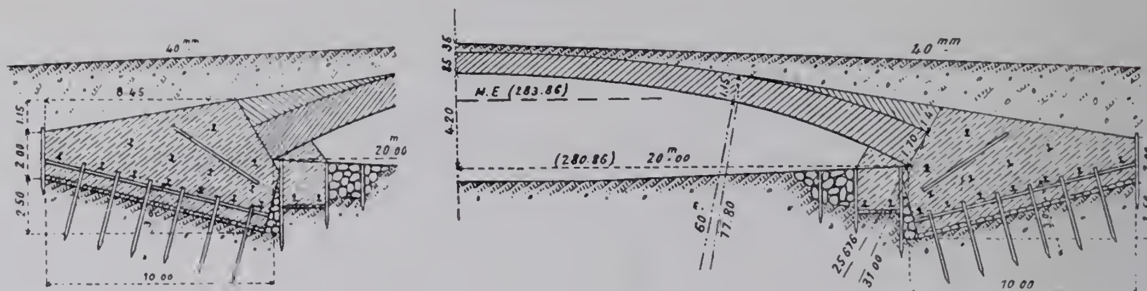
Route de Ziegenhals à Zuckmantel

1905 $\overline{\mathbf{A}}^1$ r^{te} (⩾ 40^m)^5

f$_1$ — Élévation — 2^{mm}



f$_2$ — Coupe en long — 3^{mm}



1. Personnel. — *Projet et Entreprise :* MM. Liebold et Cie, de Langebrück (Saxe).

SOURCE :

S$_1$. — Dessins d'exécution que m'ont gracieusement remis MM. Liebold, en 1908.

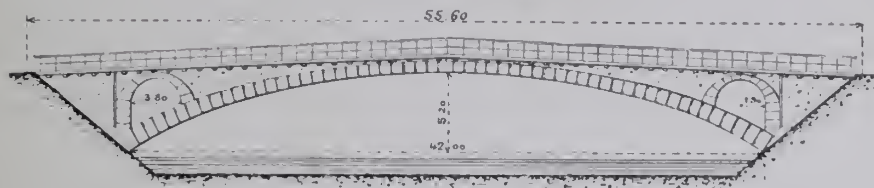
PONT SUR LA GLATZER NEISSE, A MICHELAU

(ALLEMAGNE, - Silésie, - Cercle de Brieg)

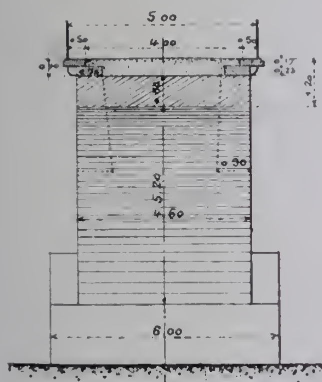
Route de Michelau à Gross Saarne

1905-1906 $\bar{A}^1$ r[te] (= 40m,6)

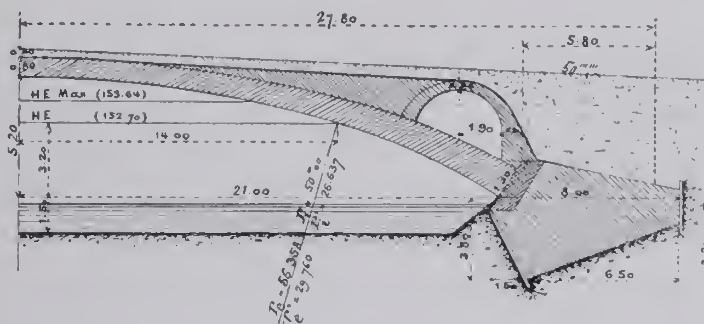
f1 — Élévation — 2mm



f3 — Coupe en travers à la clef — 5mm

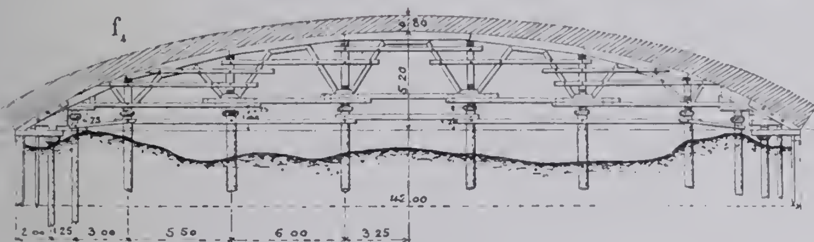


f2 — Coupe en long — 3mm

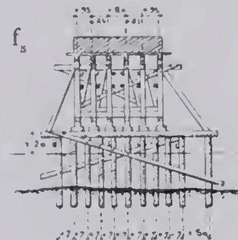


Cintre — 2mm5

f4



f5



1. Dates (S2).

Commencement des travaux	27 septembre 1905
Grande voûte	15-26 mai 1906
Décintrement	6 juillet 1906
Ouverture à la circulation	24 août 1906

Φ_1 (S_2)



2. Personnel (S_2) — *Projet et Entreprise :* MM. Liebold et Cie, de Langebrück (Saxe).

Direction des Travaux : M. Schleicher, « Regierungsbaumeister ».

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution qu'ont bien voulu me remettre MM. Liebold, en 1908.

S_2. — Renseignements et photographie que m'a gracieusement adressés, en juillet 1909, M. Gretschel « Landesbaurat », à Breslau.

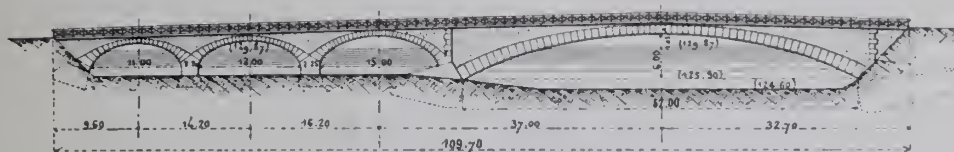
PONT SUR LA QUEIS, A NEUHAMMER

(ALLEMAGNE, – Silésie, – Cercle de Sagan)

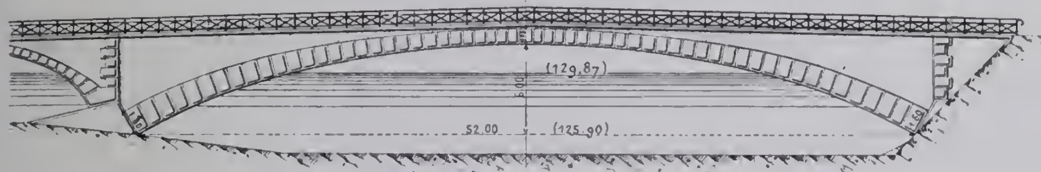
Route du village à la gare

Projet : 1905 (S₁) A¹ P^le (= 40m,7)

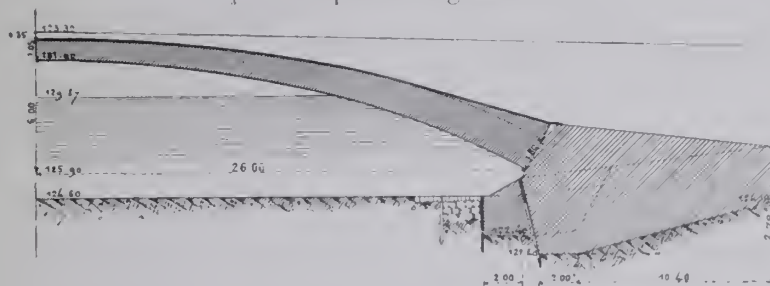
f₁ — Ensemble — 1mm



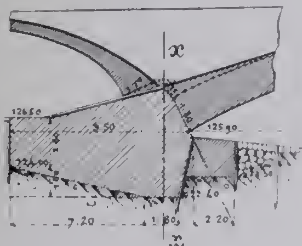
f₂ — Grande arche — 2mm



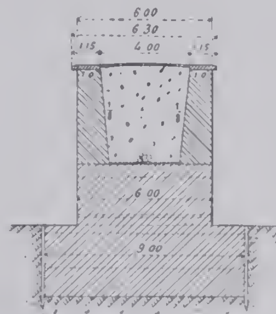
f₃ — Coupe en long — 2mm5



f₄ — Culée — 2mm5



f₅ — Coupe en travers sur *xx* de f₄ — 3mm



1. Aspect (S_2). — On a simulé de très grosses pierres de taille aux têtes et aux chaînes d'angle.

Φ_1 (S_2)



Les tympans sont crépis. La douelle est barbouillée de mortier.

On paraît s'être peu préoccupé de l'aspect.

2. Personnel. — *Projet et Entreprise :* MM. Liebold et Cie, de Langebrück (Saxe).

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution qu'ont bien voulu me remettre MM. Liebold, en 1908.

S_2. — Ce que j'ai vu — août 1909.

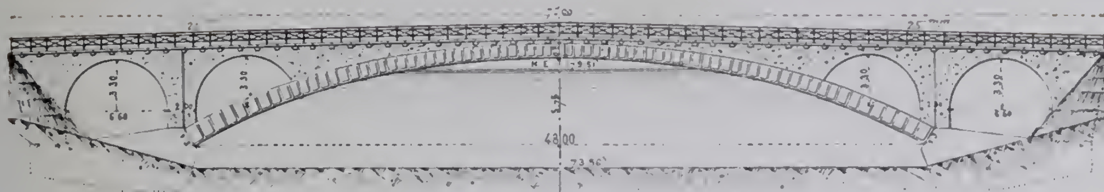
PONT SUR LA BARTSCH, A SCHWUSEN

(ALLEMAGNE, — Silésie, — Cercle de Glogau)

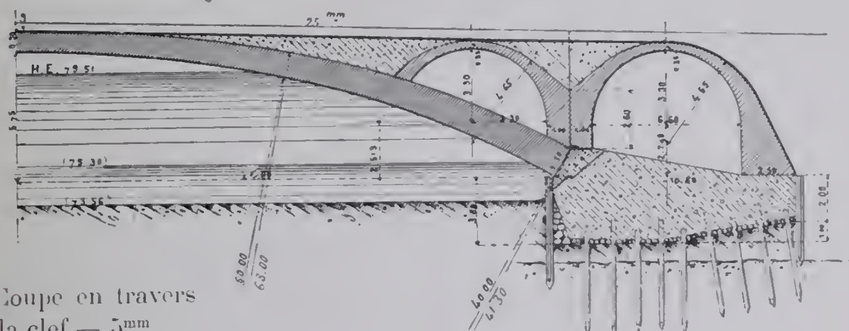
Route de Schwusen à Fraustadt

1907 $\bar{A}^1$ r^te^ = 40m,8

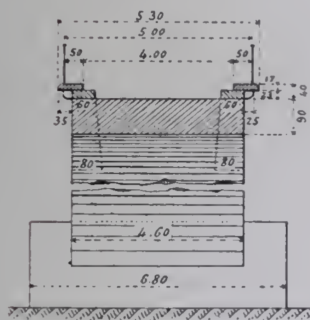
f_1 — Élévation — 2mm



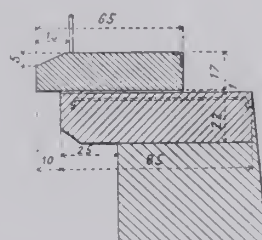
f_2 — Coupe en long — 3mm



f_3 — Coupe en travers à la clef — 5mm

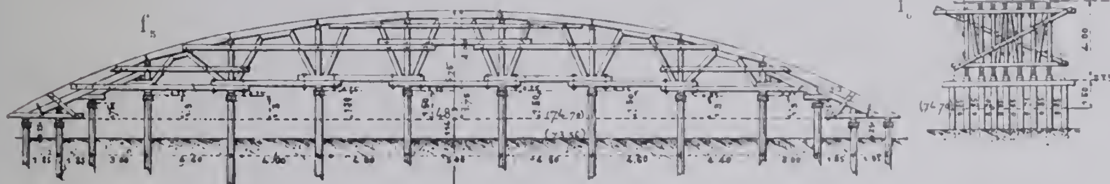


f_4 Couronnement 3cm



Cintre — 2mm5

f_5 f_6



I. Personnel. — *Projet et Entreprise :* MM. Liebold et Cie, de Langebrück (Saxe).

SOURCE :

S_1. — Dessins d'exécution que m'ont gracieusement remis MM. Liebold, en 1908.

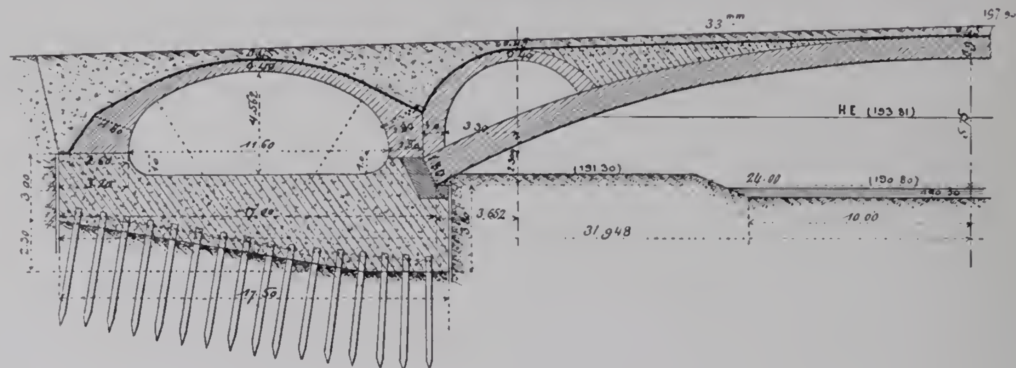
PONT SUR LA FREIWALDAUER BIELE, A KUPFERHAMMER

(ALLEMAGNE, – Silesie, – Cercle de Neisse)

Route de Weidenau à Neisse

1907 $\overline{\mathbf{A}}^1$ r^{te} ($\geqslant$ 40m),9

f, — Coupe en long — 3mm



1. Personnel. — *Projet et Entreprise :* MM. Liebold et Cie, de Langebrück (Saxe).

SOURCE :

S, — Dessin qu'ont bien voulu me remettre MM. Liebold, en 1908.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ [1]

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS CONDUITE D'EAU

(AQUEDUCS)

Série A[1] aq $_{(> 40^{m})}$ [2]

Voir Préliminaires, Tome III, p. 3 et 4.

1. — pour la définition des arcs « très surbaissés ».

2. — pour le sens de ce symbole.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CONDUITE D'EAU

PONT	PROJET							
	ENSEMBLE		GRANDE VOÛTE					
Date Symbole	*Longueur de l'ouvrage* Déclivité Hauteur maxima de l'ouvrage au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeur *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans	INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS CORPS Clef *Retombées*	ÉPAISSEURS TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg / $\overline{0^m01}^2$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMEN[T] DES TYMPAN[S] 2° *DÉCORA[TION] DES TÊ[TES]*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Weisenbach** *Allemagne* 1885 $\overline{\mathbf{A}}^1$ aq (> 40m) [1]	» » »	*1m* *entre bandeaux* Largeur de la conduite : 2m 20	**40m,00** *5m 00* $\frac{1}{8}$ = 0,125	**1m,35** *1m,70*		Béton fait à la main 1v – 2v,5 – 5v Ciment Dyckerhoff et fils de Biebrich Aux têtes, joints simulant de grandes pierres de taille	Pression Clef : 20k Naissances : 25k » 4mc5 d'eau par m. ct	1° Voûte[s] transvers[ales] vues, en plein c[intre] 2° »

1 — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, page II, n° 6

(AQUEDUCS) SÉRIE A^1 aq (> 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE

...NDATIONS *...ure du sol* ...ofondeur ...-l'étiage ...ressions ...r le sol ...g 0m01² *...rocédé*	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
	Fixe				Voûte construite par tranches de 4 à 5m séparées par des joints de 4c à l'intrados, 5c5 à l'extrados, matés après 7 semaines. (le retrait du béton achevé.)	Voûte nue *1 jour après matage* »	t'_v 0	

...le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — A. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CONDUITE D'EAU (AQUEDUCS)

SÉRIE $\bar{A}^1$ aq (> 40m)

MONOGRAPHIES

PONT SUR LA MURG, PRÈS DE WEISENBACH[1]

(ALLEMAGNE, – Grand Duché de Bade)

Canal d'amenée à l'usine Holzmann

1885 $\bar{A}^1$ aq (> 40m) 1

Φ_1 (S_2)



1. — à 3^k environ en amont (S_2).

1. Exécution de la voûte (S_1). — On pilonnait le béton par couches parallèles à la douelle, entre cloisons transversales espacées de 4 à 5^m. On enlevait ces cloisons, puis on dressait les parois des tranches.

On n'a pas eu à soutenir les tranches des reins.

2. Date (S_1). — Le pont a été achevé à la fin de l'automne 1885.

3. Personnel (S_1).

Ingénieur : M. Karl von Muller, de Fribourg en Brisgau.

Entrepreneurs : MM. Thormann et Schneller, d'Augsbourg.

Le projet de cintre est de MM. Thormann et Stiefel.

SOURCES :

S_1. — Lettres de M. Karl von Muller à M. Max Leibbrand, Landesbaurat à Sigmaringen (7 et 9 août 1906), que M. Leibbrand a bien voulu me communiquer, — juillet 1909.

S_2. — Ce que j'ai vu — septembre 1908.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ [1]

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

Série $\overset{\frown}{\mathbf{A}}^{1}\ \mathrm{F}^{r}_{(\geqslant 40^{m})}$ [2]

Voir Préliminaires, Tome III, p. 3 et 4
1. — pour la définition des arcs « très surbaissés »,
2 — pour le sens de ce symbole.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER

PONT	PROJET							
	ENSEMBLE		GRANDE VOÛTE					
			INTRADOS	ÉPAISSEURS		MATÉRIAUX	PRESSIONS	1° ÉVIDEMENT DES TYMPANS 2° DÉCORATION DES TÊTES
PONT Date Symbole	*Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	CORPS Clef *Retombées*	TÊTES Clef *Retombées*	*Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	en kg 0^m01^2 *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Bellows Falls** *États-Unis* 1899 $\overline{A}^1$ Fr (... 40m) 1 *2 voûtes égales buttant contre le même rocher.* *Ce sont deux* $\overline{A}^1$, *ce n'est pas un* $\overline{A}^n$.	*109m 98* » 24m38	Pas de parapets *8m23* Pas de fruit 2m438 jusqu'au-dessus du rail	Arc de cercle 42m,672 *6m096* $\frac{1}{7} = 0{,}143$ *40m386*	1m,219 *1m219* rouleau d'épaisseur uniforme	1m,219 *1m219*	Bandeaux et Douelle : L [1] Hauteur uniforme.. 1m219 Épaisseur . Intrados....... 0m616 Extrados...... 0m635 Aux reins, à partir de 7m de la clef, remplissage en maçonnerie de 0 à 3m50 d'épaisseur *Ciment Portland*	Pression Intrad. Extrad *sans surcharge* Clef 39k4 19k7 Retombées 58k6 (effort MAX.) 14k6 *avec surcharge* *1° sur toute la voûte* Clef 49k7 24k1 A 16m de la clef 25k8 54k7 (effort MAX.) Retombées 53k7 36k1 *2° sur une 1/2 voûte* Clef 50k5 16k a - 1/2 voûte chargée Retombées 76k (effort MAX.) 7k3 b - 1/2 voûte non chargée A 4m de la clef 57k1 (effort MAX.) 10k Retombées 29k8 50k8 » 8940k 1mc	1° Pas d'évidement 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

A VOIE NORMALE SÉRIE $\overline{A}^1$ Fr (⩾40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0m01² *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	 par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité de surface utile S_p [3], de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Rocher	Arche sur la rivière : Retroussé sur 11m58 » Coins sous les couchis	6 *25cm* 1m539 *76mm*	Pour les 2 cintres : 548mc	 0mc65	Joints matés à la spatule	Arche Est » *21 jours* »	t_c 25mm t'_v 0	Q = 3069mc Q : S_p = 3mc39 Q : W = 0mc23 D = 282 310f y compris la démolition de l'ancien pont. D : S_p = 311f9 D : W = 21f1 D : Q = 92f0
»	Arche de décharge : Fixe » Coins sous les couchis					Arche Ouest » *30 jours* »		

Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 7) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\overline{A}^1$ F^r ($\geqslant$ 40m)

MONOGRAPHIES

PONT DE BELLOWS FALLS, SUR LE CONNECTICUT

(ÉTATS-UNIS, - Vermont)

Ligne de Boston[1] *à Montreal, par Fitchburg et Rutland*

(Boston and Maine R.R.)

1899 $\overline{A}^1$ F^r ($\geqslant$ 40m) 1

Φ_1 (S_2)



1. **Pourquoi il est dans la série $\overline{A}^1$.** — Ce n'est pas un pont à deux arches (A^n). Ce sont deux arches uniques buttant contre le même rocher.

[1] — à 114 milles de Boston.

f_1 — Ensemble — 1^{mm}

f_2 — Arche sur la rivière — 2^{mm}

f_3 — Coupe en travers aux retombées — 3^{mm}

f — Détail du cintre — 2^{cm}

f_4 — Cintre de l'arche sur la rivière — $2^{mm}5$

2. Pourquoi on a fait un pont en maçonnerie. — Il remplace un pont en bois à deux travées : on a adopté des arches en maçonnerie, comme les plus vite faites et les moins chères.

3. Couronnement. — La plinthe est en deux assises en porte-à-faux de 15cm chacune.

Il n'y a pas de garde-corps.

4. Cintres. — *A. - Partie au-dessus des naissances.* — Elle est la même pour les deux cintres.

Les montants et contrefiches sont en sapin de 25cm × 30cm.

Les assemblages tiennent par des broches : les pièces n'en sont pas entaillées.

Les vaux V (f_3) sont formés de 4 cours de planches de 7cm6 × 25cm4, clouées l'une sur l'autre en découpe.

Les couchis *c*, de 20cm × 20cm, portent sur des coins en chêne W de 15cm de largeur et 45cm7 de longueur. Il y a une paire de coins par couchis et par ferme, soit 72 par ferme, 432 par voûte.

Au décintrement, il a été très difficile de décoller ces coins, probablement parce qu'ils étaient en bois vert non raboté.

Les couchis portent un platelage *p* de 7cm6 (f_4).

Pour tenir compte des bosses des voussoirs en douelle, on a ménagé entre le platelage et la douelle théorique, un jeu *e* de 7cm6 (S_2). On a posé les voussoirs sur des liteaux taillés en V, puis bourré le vide de fil de caret [2].

B. - Partie au-dessous des naissances. — Les montants sont en pin dur de 35cm × 40cm.

A cause de la violence du courant, on a dû retrousser sur 11m58 le cintre de l'arche en rivière : il porte sur deux montants inclinés s'appuyant sur une semelle posée sur une plate-forme en béton étalée sur le rocher.

Les autres montants du cintre en rivière, et tout l'étage inférieur de l'autre, s'appuient directement sur le rocher préalablement nivelé.

Des goujons de 30cm de long, 38mm de diamètre, pénètrent par moitié dans le rocher, par moitié dans les montants.

La charge sur les poteaux du milieu est d'environ 30 tonnes.

5. Exécution des voûtes. — Les joints des libages, de 13mm à l'intrados et 51mm à l'extrados, ont été matés [3] au mortier de ciment Portland, avec des spatules [4] en fer, de 13mm d'épaisseur et 76mm de largeur.

La voûte Est, cubant 458m³7, a été construite en 4 jours.

2. — « *rope yarn* ».

3. — « *tamped* ».

4. — « *strips* ».

6. Quantités.

Voûtes et socles	$964^{mc}8$
Plinthes	$218^{mc}6$
Tympans et remplissage	1886^{mc}
Béton en fondation (cintre)	$137^{mc}6$
	$3207^{mc}0$

7. Dates. — Les travaux ont commencé le 12 septembre 1899. Les trains ont passé sur le pont le 10 décembre 1899, soit 90 jours après.

8. Personnel.

Projet : M. A. S. Cheever, Ingénieur en chef de la Division de Fitchburg, (Boston and Maine R.R.)

Entrepreneur : M. J. W. Rollins, Jr, Ingénieur de la Maison Holbrook, Cabot et Daly.

SOURCES :

S_1. — Engineering News, 21 juin 1900, p. 402 : « *New double 140 Ft. span stone arch* « *bridge for the Fitchburg R R., at Bellows Falls, Vt.* »

S_2. — Dessins d'exécution et photographies, gracieusement communiqués par M. A. S. Cheever, Member Am. Soc. C. E. « Superintendent Fitchburg Div. », Boston and Maine R. R.

Ce qui n'est pas spécifié S_2 est de S_1.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ [1]

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES

SOUS ROUTE

Série $\bar{A}^{n} r^{te}_{(\geqslant 40^{m})}$ [2]

Voir Préliminaires, Tome III, p. 3 et 4 :
1. — pour la définition des arcs « très surbaissés ».
2. — pour le sens de ce symbole.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

	PROJET							
	ENSEMBLE		GRANDES VOÛTES					
				ÉPAISSEURS				
PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	*Longueur entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	CORPS Clef *Retombées*	TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg 0m01² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMEN[T] DES TYMPAN[S] 2° *DÉCORATI[ON] DES TÊT[ES]*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Putney** *Angleterre* 1882-1883 A n r^te (< 40m) 1 *5 voûtes en arc : une centrale de 13m 891 à 1/7.46 2 intermédiaires de 39m319 à 1/7.94 2 de rive de 34m138 à 1/8,61*	» 1/33, 1/45, 1/45, 1/33 »	13m 411 *11m 325* Léger fruit »	Arc de cercle **43m, 891** *5m 86* $\frac{1}{7,46} = 0,133$ *43m 97*	1m,372 *1m 676 vers les retombées*		Bandeaux : PT[1] Granit *Ciment Portland*		1° Dalles sur mu[rs] longitudin[aux] de 0m57 espacés [de] 1m06 et 1[…] 2°
Boucicaut *France* 1888-1890 A n r^te (< 40m) 2 *5 voûtes égales de 40m*	*233m 94* 0 11m 36	8m 00 *8m 70* Pas de fruit 0m 55	Arc de projection de chaînette renflé par rapport à l'arc de cercle de 0m263 à 70 % de la 1/2 portée à partir de la clef **40m, 00** *5m 00* $\frac{1}{8} = 0,125$ *53m 90* *26m 07*	1m, 05 *1m 238*	1m, 05 *1m 238*	Bandeaux : PT[1] Joints de 8mm Douelle et Queutage : MAV[1] taillés sur les 6 faces Calcaire de Villebois (1096k en moyenne) *Ciment artificiel Vicat — 600k*	Pression moyenne à la clef : 19k9 *Courbe de pression passant par les milieux des joints de clef et de retombées* »	1° Pas d'évidem[ent] 2° *Médaill[ons] dans les tymp[ans] au-dessu[s] des piles*
de **Mehring** *Allemagne* 1903-1904 A n r^te (< 40m) 3 *4 voûtes égales de 46m*	*237m* » 12m 70	6m 50 *6m 30* » »	Arc d'anse de panier à 3 centres **46m, 00** *6m 17* $\frac{1}{7,455} = 0,134$ *60m* *31m 95*	1m, 00 *1m 30*	1m, 00 *1m 30*	Béton : 1v, 3v, 5v	Pression — MAX. / MOY. Clef : » / 21k3 Retombées : 31k5 / 18k6 » 520k mq et Rouleau à vapeur de 18t	1° 8 voûte[s] transvers[ales] vues, en plein cin[tre] de 2m00 sur pile[s] de 0m70 2°

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

SÉRIE $\overline{A}^n$ 1re ($\geqslant 40^m$)

TABLEAU SYNOPTIQUE

EXÉCUTION								CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER
FONDATIONS	GRANDES VOÛTES							Q
	CINTRES				MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT	TASSEMENTS DE LA CLEF	DÉPENSE
Nature du sol Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0^m01^2 *Procédé*	FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	FERMES Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	Cube de bois Poids de fer Dépenses par mq de douelle [2]		État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	sur cintre t_c au décintrement t_v après t''_v	D Totaux et par unité de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Argile dure » » Piles : *Caissons métalliques havés* Culées : *Épuisements dans des batardeaux*	Arche centrale Retroussé sur 16^m76 *Tôle* Coins On a construit 5 cintres.	9 » 1^m727			Voussoirs sur bandes de plomb de 5^{mm}, larges de 5^{cm}, placées suivant le rayon.			D = 6153680^f Prix d'adjudication
Schiste argileux fin affouillable Piles : *Béton immergé dans un caisson sans fond échoué sur pilotis enrochés* Pression maxima : sur le béton : 6^k7 sur le sol entre le de pieux 3^k3 Culées : *Pieux espacés de 1^m20 et béton*	Arche rive droite : Retroussé sur 10^m60 (marinier) Autres arches : Fixes Poteaux, poinçons, triangles Vérins On a construit 5 cintres.	6 *2.5^{cm}* 1^m60	Cintre marinier. 326^{mc} 5558^k 17342^f Cintre courant. 273^{mc} 2885^k 13165^f	 $0^{mc}89$ 15^k17 47^f34 $0^{mc}75$ 7^k88 35^f93	A pleine épaisseur. 6 tronçons, 7 clavages.	Arche rive droite (n° 1) (décintrée prématurément) Autres arches : Tympans montés au niveau des extrados. Voûte n° 2 — *229 j.* 3 — *207 j.* 4 — *185 j.* 5 RG — *67 j.* 5 juin	t'_v 44^{mm} « anormal » t'_v / t''_v 8^{mm} / 23^{mm} 13 / 31 6 / 22 11 / 40	Fondations / Élévation / Ensemble D : 128000^f / 358000^f [6] / 486000^f D : S_p : 68^f4 / 191^f3 / 259^f7 D : W : 5^f6 / 15^f7 / 21^f3 6. — Dont 10.000^f pour les bornes et médaillons.
Rocher » » *A chaque pile, 2 caissons havés.*	Aux 2 arches du milieu, passe marinière de 11^m20 » Coins	6 *20^{cm}* 1^m18 *100^{mm}*	A chaque cintre marinier. Pieux 28^{mc} Etage inférieur 52^{mc} Etage supérieur 89^{mc} Platelage 14^{mc} 183^{mc} Pour les 4 cintres. 900^{mc} 10000^k	 $0^{mc}62$	Tranches symétriques.	Voûtes nues *RG* *19 j.* *16 j.* *57 j.* *RD* *63 j.*	t_c 70^{mm} (cintre marinier) t'_v 8^{mm} 30 10 15	Fondations / Élévation / Ensemble D : 75274^f / 186643^f / 261917^f D : S_p : 48^f8 / 121^f2 / 170^f D : W : 3^f8 / 9^f4 / 13^f2

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A* 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs *entre parapets* / *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	GRANDES VOÛTES — INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Retombées*	ÉPAISSEURS — TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg $\overline{0^{m}01}^{2}$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMEN[TS] DES TYMPAN[S] 2° *DÉCORATI[ON] DES TÊTE[S]*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
d' **Orléans** *France* 1904-1906 **Ā**n Pte (> 40m) 4 *7 voûtes égales*	*353m 42* 10mm — parabole — 4mm RG • 48m • RI 13m 41	13m 45 *13m 80* Pas de fruit 0m906	Arc de projection de chaînette renflé par rapport à l'arc de cercle de 0m13 à 72 0 0 de la 1/2 portée à partir de la clef. **43m 85** *5m 80* $\frac{1}{7,56}$ = 0,132 *48m 827* »	1m 25 *1m 158*	1m 25 *1m 158*	Bandeaux : PT [1] Douelle : MAV [1] Calcaire de Massangis (Yonne) 710k —— Queutage : MAV [1] Calcaire d'Ancy le Franc, de Larrys (dur), de Chassignelles (Yonne), etc. Parties vues de l'extrados : Calcaire de : Massangis (Yonne) Senozan (Saône-et-Loire), Saint-Florent (Cher), Comblanchien (Côte d'Or) 600 à 1100k —— *Ciment lent Candlot — 600k*	Pression MAX. / moy. *sans surcharge* Clef 26k8 (extr.) 18k9 Retombées 33k9 (intr.) 18k9 *avec surcharge* *1° sur toute la voûte* Clef 29k1 (extr.) 20k5 Retombées 36k8 (intr.) 20k5 *2° sur les 4/5 de la 1/2 portée à partir de l'appui (position la plus défavorable)* Clef 29k6 (extr.) 19k7 Retombées 39k5 (intr.) 19k6 tension — 0k3 *Arc élastique* 500k mq	1° 8 voûtes transversal[es] vues, en arc de cer[cle] de 2m80 à 1/6,51, sur piles de 0m65, percées de 4 voûte[s] en plein cint[re] de 1m60 2° *Archivolt[es]*
de **Krappitz** *Allemagne* 1905 **Ā**n Pte (> 40m) 5 *Une voûte de 50m ; entre 2 voûtes en arc, de 25m à 1/5,55*	» » 9m (lit)	» » 0m40	Arc d'anse de panier à 3 centres **50m 00** *6m 00* $\frac{1}{8,33}$ = 0,12 *64m 10* *11m90*	1m 20 *2m 00*	1m 20 *2m 00*	Voûte en petits moellons, Aux têtes, crépi simulant de grandes pierres de taille *Ciment — 0mc333*		1° 12 voûtes transversal[es] vues, en plein cintr[e] de 1m, sur piles de 1m 2° »
de **Gross-Kunzendorf** *Allemagne* **Ā**n Pte (> 40m) 6 *Une voûte de 40m entre 2 voûtes en arc, de 20m à 1/5,55*	*100m 80* » 7m (étiage)	8m 30 *7m 20* » 0m45	**40m 00** *4m 20* $\frac{1}{9,523}$ = 0,105	0m 90 *1m 35*	0m 90 *1m 35*	Comme au Pont de Krappitz **Ā**n Pte (> 40m) 5		1° Pas d'évidement 2° »

1 — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, page II, n° [illegible]

SÉRIE A^n 1re (> 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE *(Suite)*

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0m01² *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDES VOÛTES — CINTRES — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité de surface utile S_p [3], de volume « utile » W [4].
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Marne – 4m7 à – 18m6 Pression maxima : Culées : 17k3 Piles : 9k4 *Air comprimé*	Aux 2 arches RD : Retroussé sur 9m (marinier) Aux 5 autres arches : Fixe Montants et contrefiches *Sapin* Boîtes à sable	9 *25cm* 1m70 »	Moyenne des 7 cintres Pieux compris 370mc 9637k 25413f	 0mc58 15k2 40f1	A pleine épaisseur 10 tronçons 11 clavages	Voûtes nues Arches nos 1 (RD).. *73 j.*.. 8mm 2....... *63 j.*.. 6mm6 3....... *51 j.*.. 8mm3 *29-31 mai* Arches nos 4 et 5, décintrées partiellement avec 1, 2, 3, complètement avec 6 et 7 Arches nos 6....... *68 j.*.. 5mm 7 (RG).. *62 j.*.. 7mm4 *24-25 juillet*	t_c (en *mm*) Clef / Reins Cintres courants : 20 à 29 / 25 à 38.5 mariniers : 38 à 59 / 14 à 29.5 t'_v (en *mm*) (moyenne des 2 têtes)	(see table below)
Béton ... de rails, sur pilotis								
Argile ferme » » *Béton ... de rails, sur pilotis*								

Column 18 (first row):

	Fondations	Élévation	Ensemble
Q	14355mc	18816mc	33171mc
Q : S_p	2mc99	3mc96	6mc95
Q : W	0mc25	0mc32	0mc57
D	922462f	1369472f	2291934f
D : S_p	194f1	288f1	482f2
D : W	15f8	23f4	39f2
D : Q	64f3	72f8	69f1

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation. 4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	ENSEMBLE Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	GRANDES VOÛTES INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS CORPS Clef *Retombées*	ÉPAISSEURS TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg $/ \overline{0^m01}^2$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENT DES TYMPANS 2° *DÉCORATI[ON] DES TÊT[ES]*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Schweich** *Allemagne* 1905-1906 $\bar{A}^n$ r^{te} (> 40m) 7 *15 voûtes en arc : 3 de 16m, 3 de 10m (RD), 9 de 10 à 15m (RG).*	*309m 15* 0 au-dessus des voûtes de 46m 15m (lit)	7m 00 *6m 60* Pas de fruit 0m30	Arc d'anse de panier à 3 centres **46m,00** *6m 17* $\frac{1}{7,455} = 0,134$ *60m 00* *31m 95*	**1m,00** *1m 30*		Béton Ciment 1v Sable de la Moselle 2v5 Gravier de la Moselle 5v	Pression avec surcharge : MAX. / moy. Clef 33k8 / 21k1 Retombées 32k8 / 19k3 400k mq et Rouleau à vapeur de 24t	1° 10 voût[es] transversa[les] vues, en plein cin[tre] de 2m, en béton ar[mé] sur pile[s] de 0m70 à 1[m] 2° »
d' **Avignon** *France* 1905-1909 $\bar{A}^n$ r^{te} (= 40m) 8 *10 voûtes de 40m.*	*465m* Dos d'ane Déclivités maxima : 6mm3 (RD) 13mm (RG) 12m87 (etiage)	10m,00 *8m 20* Pas de fruit 0m64	Arc de projection de chainette renflé par rapport à l'arc de cercle de 0m263 à 70 0/0 de la 1/2 portée à partir de la clef **40m,00** *5m 00* $\frac{1}{8} = 0,125$ *53m 90* *26m 07*	**1m,05** *1m,237*	**1m,05** *1m 237*	Bandeaux : PT [1] Joints de 10mm Douelle et Queutage : MAV [1] Joints de 25 à 30mm Calcaire de Ruoms *Ciment maritime Pavin de Lafarge 600k* *Mortier fait à la main*	Pression maxima : Clef : 31k5 Retombees : 37k2 *Arc élastique*	1° Pas d'évidem[ent] Rempliss[age] en gravie[r] 2° »
de **Trittenheim** *Allemagne* 1907-1908 $\bar{A}^n$ r^{te} (> 40m) 9 *4 voûtes en arc : 3 de 46m, 1 de 30m à 1/6,711.*	*208m* 30mm 10mm 19m (lit)	6m,50 *6m 10* Pas de fruit 0m35	Arc d'anse de panier à 3 centres **46m,00** *6m 17* $\frac{1}{7,455} = 0,134$ *56m 00* *33m 55*	**1m,00** *1m 30*		Béton Ciment 1v Sable de la Moselle 2v5 Gravier de la Moselle 5v	Pression avec surcharge : MAX. / moy. Clef — / 22k5 Retombées 29k2 / 21k6 500k mq et Rouleau à vapeur de 24t	1° 10 voutes transversal[es] vues, en plein cintr[e] de 2m, en béton arm[é] 2° »

1 Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, page II, n° 6.

SÉRIE $\bar{A}^{n}$ 1re (⩾ 40^m)

TABLEAU SYNOPTIQUE *(Suite)*

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0^m01^2 *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDES VOÛTES — CINTRES — FERMES: Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Rocher » Pression maxima : 8k6 »	Arche centrale : Retroussé sur 16^m (marinier) Autres arches : Fixes » Coins	7 *20cm* 1^m06 *100mm*	Cintre marinier : Pieux 37^{mc} Étage infr 46^{mc} Étage supr 160^{mc} Platelage 16^{mc} 259^{mc}	$0^{mc}87$	A pleine épaisseur Tranches de 1^m50 de largeur		t_c = 90^{mm} (arche centrale) t'_v 20^{mm} environ	$Q = 6963^{mc}$ $Q : S_p = 3^{mc}05$ $Q : W = 0^{mc}29$ Fondations / Élévation / Ensemble D : 80019^f / 228481^f / 308500^f $D : S_p$: 35^f1 / 100^f1 / 135^f2 D : W : 3^f4 / 9^f6 / 13^f0 D : Q : » / » / 44^f3
Culée RG et Piles 1 et 5 *Marne* -13^m10 à -15^m01 Piles 2, 3, 4 *Gravier* -13^m87 à -16^m34 Piles 6 à 9 et Culée RD *Rocher calcaire* -14^m03 à -6^m Pression maxima : 12k3 *Air comprimé*	Fixes » Boîtes à sable	6 *30cm* 1^m50 »	Moyenne des 5 cintres : 239^{mc} 16574^k 16808^f	$0^{mc}69$ 48^k 48^f7	A pleine épaisseur 9 clavages.	Voûtes nues Vte n° — *Temps sur cintre* — Date du décint. 1 (RG) — *129 j.* — 20-II 2 — *113* — 20-III 3 — *100* — 16-IV 4 — *90* — 15-V 5 — *91* — 23-VI 6 — *86* — 23-VII 7 — *81* — 26-VIII 8 — *68* — 8-IX 9 — *57* — 29-IX 10 (RD) — *76* — 18-XI	t_c min : 36^{mm} (vte 10) MAX : 100^{mm} (vte 4) t'_v moyenne des 2 têtes : 9^{mm} $7^{mm}7$ 6 2 6 3 8 6 14 8 14 8 16 8 17 6	$Q = 24504^{mc}$ $Q : S_p = 53^{mc}2$ $Q : W = 0^{mc}48$ Fondations / Élévation / Ensemble D : 663661^f / 1019423^f / 1683084^f $D : S_p$: 146^f5 / 219^f2 / 365^f7 D : W : 13^f0 / 20^f2 / 33^f2 D : Q : » / » / 68^f9
Rocher . Pression : 4k5 .	Arche centrale : Retroussé sur 16^m (marinier) Autres arches : Fixes	6 *20cm* 1^m17 *100mm*			A pleine épaisseur Tranches de 1^m50 de largeur		t'_v 12^{mm} à 15^{mm}	$Q = 4920^{mc}$ $Q : S_p = 3^{mc}63$ $Q : W = 0^{mc}27$ Fondations / Élévation / Ensemble D : 69789^f / 214031^f / 283820^f $D : S_p$: 51^f6 / 158^f3 / 209^f9 D : W : 3^f8 / 11^f6 / 15^f4 D : Q : » / » / 57^f7

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation. 4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

PONT Date - Symbole *En quoi consiste l'ouvrage* 1	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage 2	PROJET — ENSEMBLE Largeurs { entre parapets / *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados 3	GRANDES VOÛTES INTRADOS { Portée / *Montée* Surbaissement *Rayon* 4	GRANDES VOÛTES — ÉPAISSEURS CORPS { Clef / *Retombées* 5	GRANDES VOÛTES — ÉPAISSEURS TÊTES { Clef / *Retombées* 6	GRANDES VOÛTES MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment* 7	GRANDES VOÛTES PRESSIONS en kg $\overline{0^{m}01}^{2}$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées 8	1° ÉVIDEMENT DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES* 9
de **Longuich** *Allemagne* 1909-1911 $\overline{\text{A}}^{n}$ r^{te} (> 40m) 10 *4 voûtes en arc : une de 46m, 2 de 43m, une de 34m.*	*248m* Dos d'âne Déclivité maxima : 60mm 13m20	{ 4m60 / *1m10* Pas de fruit 0m35	*Voûte de 46m* Arc de cercle { 46m,00 / *6m17* $\frac{1}{7,455}$ = 0,134 *45m95*	*Voûte de 46m* { 1m,05 / *1m20*	*Voûte de 46m* { 1m,05 / *1m20*	Béton Ciment .... 1v Sable naturel et gravier 8v	» *Courbes de pression avec points de passage arbitrairement choisis* 500k/mq et Rouleau à vapeur de 24T	1° Piliers en béton armé de 40cm × 40cm portant une plate-forme armée. 2° »
			Voûtes de 43m Arc de cercle { 43m,00 / *5m34* $\frac{1}{8,052}$ = 0,124 *45m95*	*Voûtes de 43m* { 0m,95 / *1m,10*	*Voûtes de 43m* { 0m,95 / *1m10*			

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. 11, n° 6.

SÉRIE $\bar{A}^n$ 1re (≥ 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE *(Suite)*

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg $\overline{0^m01}^2$ *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDES VOÛTES — CINTRES — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER $\underline{Q}$ DÉPENSE $\underline{D}$ Totaux et par unité de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
	Voûte de 46m							
Rocher — »	Retroussé sur 20m Poutre métallique sur la passe marinière Coins	5 *20cm* 0m 96 *130mm*	Bois 150mc Poutre métallique 20T Boulons Crampons 3T Metal 23T	0mc 76 116k	A pleine épaisseur. Tranches isolées.	Plate-forme construite »	*Voûte de 46m* t_c 40mm t'_v 20mm	Q = 3 230mc Q : S_p = 2mc 83 Q : W = 0mc 31
	Voûtes de 43m							
Épuisements dans des batardeaux	Fixe Montants et contrefiches » Coins	5 *20cm* 0m 96 *120mm*	Bois 150mc Boulons Crampons 3T	0mc 82 16k		15 septembre		

	Fondations	Élévation	Ensemble
Q	60466f	128336f	188802f
D : S_p	53f 1	112f 4	165f 5
D : W	5f 9	12f 5	18f 4
D : Q	»	»	58f 7

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE $\overline{A}^n$ 1te (≥ 40m)

MONOGRAPHIES

PONT DE PUTNEY [1] SUR LA TAMISE (*ANGLETERRE*)

1882–1883 $\overline{A}^n$ 1te (≥ 40m) 1

Φ_1 (S_3)



I. Quelques dispositions. — Les tympans (parements en granit et corps en briques) sont élégis par 7 murs longitudinaux en briques, portant une file de dalles, puis une plate-forme continue de dalles (S_2) (f_4, f_5).

Sous chaque trottoir passent 3 tuyaux en fonte : deux de 0m61, un de 0m30.

La haute mer noye les piles jusqu'au chaperon (S_2) [2].

1. — Il relie Fulham (rive gauche) à Putney (rive droite), en amont et près de Londres.

2. — Voir la photographie du pont à marée haute (S_2, p. 626).

f$_1$ — Ensemble — 0^{mm}5

f$_2$ — Arche centrale — 2^{mm}

Coupes d'une pile de l'arche centrale — 3^{mm}

en travers — en long

f$_3$ — f$_4$

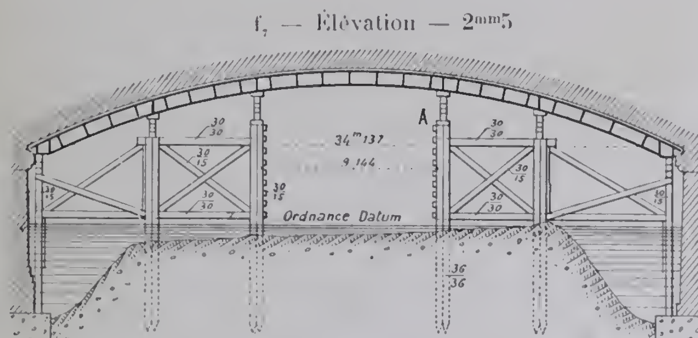
f$_5$ — Dalles sous chaussée 1^{cm}

f$_6$ — Plan d'un caisson C (f$_4$) 3^{mm}

2. Cintres (f_7 à f_{12}). — Les fermes en tôle portent sur pieux de 36cm 36cm par des billots *b*, puis par des coins *c* (f_8, f_9), qui ont servi à mettre les fermes de niveau, puis à décintrer (S_1, S_2).

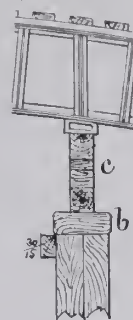
Cintre d'une arche de rive [3]

f_7 — Élévation — 2mm5

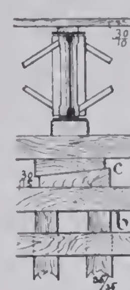


Support A — 1cm

f_8 - Élévation

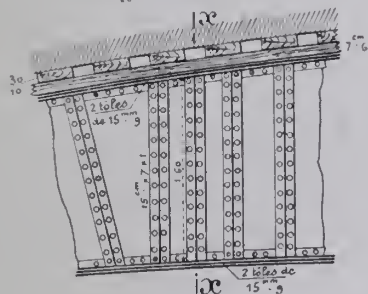


f_9 — Coupe en travers



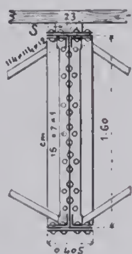
Cintre de l'arche centrale
Détails d'une ferme — 1cm5

f_{10} — Élévation



Coupes en travers

f_{11} sur *x x* de f_{10}



f_{12} à la clef



Le cintre de l'arche centrale laissait une passe libre de 16m76 de largeur avec 3m66 de revanche au-dessus de la haute mer (S_2).

Aux autres arches, la passe avait 9m14 de largeur, 3m35 de revanche (S_2).

La semelle supérieure de chaque ferme portait une fourrure en bois *s* (f_{11}), sur laquelle on cloua un platelage non jointif (f_{10}, f_{11}).

On a chargé lourdement les cintres, pour prévenir leur tassement sous le poids des voûtes (S_2).

3. Fondations. — *A. - Piles.* — Les piles et culées sont fondées dans l'argile dure [4] (S_2). Chaque pile (f_1) repose sur trois caissons rectangulaires en fer C_1, C_2, C_3, à deux parois, dont l'intervalle a été rempli de béton au fur et à mesure de la descente (S_1).

3. — S_1 ne donne pas le dessin d'ensemble du cintre de l'arche centrale, seulement celui d'une arche de rive, mais spécifie qu'ils sont, pour les 5 arches, du même type.

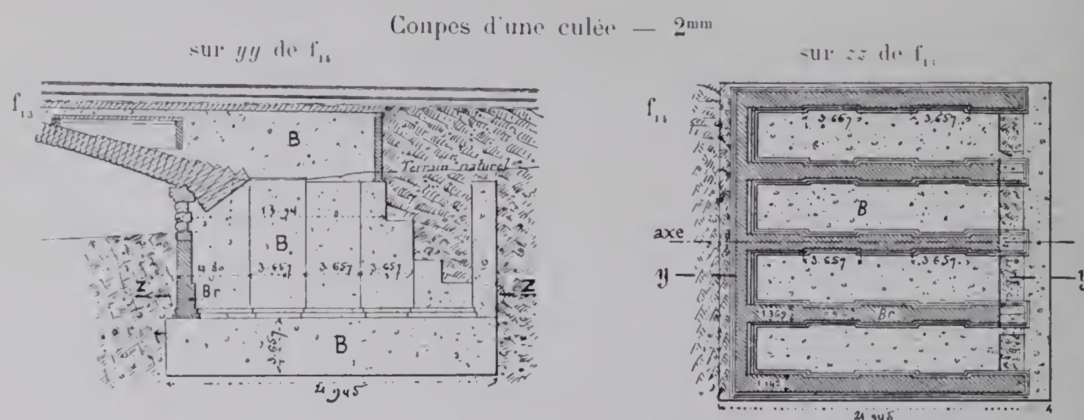
4. — «*Stiff clay* ».

On descendit ces caissons dans l'argile, en les guidant par des files de pieux. On déblaya à l'intérieur, puis, sur 0^m91 de profondeur au-dessous des couteaux et 0^m61 de largeur en dehors. Au fond, on étala d'abord une couche de béton de 0^m30, et, sur ce béton et sous les couteaux, une file de libages de 0^m61 d'épaisseur (S_2).

On remplit ensuite de béton l'intérieur des caissons, par couches de 0^m30 (S_1), et on recouvrit l'intervalle de 0^m91 qui les sépare, de dalles de $1^m83 \times 0^m91 \times 0^m91$ (S_2).

B. - Culées. — Les culées sont fondées dans des batardeaux à deux enceintes de pieux et palplanches (S_2).

Coupes d'une culée — 2^{mm}



Leurs murs sont en briques avec parements en granit ; le noyau est en béton dans des cloisons de briques (S_1, S_2). Tout est à mortier de ciment (S_2).

4. Exécution des voûtes.

— Les voussoirs avaient au moins 1^m22 de longueur suivant les génératrices de douelle, avec découpe de 46^{cm} (S_2) : on les posait sur deux bandes de plomb de 5^{mm} d'épaisseur et 5^{cm} de largeur, disposées suivant toute la hauteur du joint, à 15^{cm} des arêtes (S_1).

Lorsqu'une assise était posée, on remplissait les joints de mortier de ciment de Portland (S_1).

5. Personnel.

Ingénieurs { *Projet :* Sir J. W. Bazalgette. *Exécution :* M. Edw. Bazalgette (S_1).

Entrepreneur : M. John Waddell, d'Edimbourg.

SOURCES :

S_1. — Engineering, 23 juillet 1886, p. 85 et 86. « *Bridge over the Thames at Putney ;* « *Details of centering* ».

S_2. — Engineering, 17 mai 1895, p. 624 à 626 : « *Thames Bridges. — Putney Road* « *Bridge* ».

Ce qui n'est pas spécifié S_2 est de S_1.

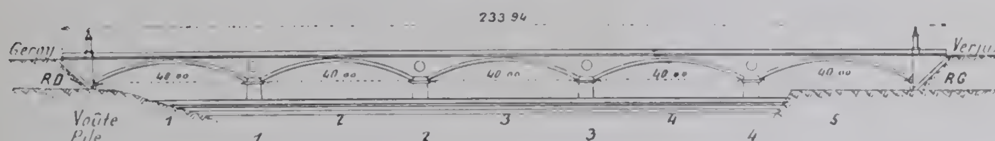
S_3. — Ce que j'ai vu — juin 1903.

PONT BOUCICAUT [1] SUR LA SAÔNE, A VERJUX [2] *(SAÔNE-ET-LOIRE)*

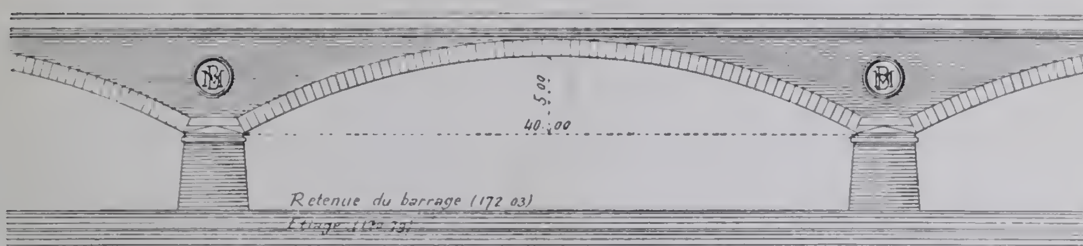
Chemin d'intérêt commun

1888–1890 $\overline{\mathbf{A}}^{n}$ r^{te} (~ 40^{m}) 2

f_1 — Ensemble, aval — $0^{mm}5$



f_2 — Une arche — 2^{mm}



1. Tracé de l'intrados. — L'intrados est défini par l'équation :

$$y = \frac{b}{2r}\left[\omega^{\frac{x}{a}} + \omega^{-\frac{x}{a}} - 2\right] \quad {}^{3}$$

dans laquelle

a (1/2 portée) $= 20^{m}$
b (montée) $= 5^{m}$
$r = 2{,}484138$ [4]
$\omega = 6{,}821685$ [4]

On vérifie que l'intrados peut s'écrire ainsi :

$$y = 1{,}006486\left[e^{\frac{x}{10{,}41608}} + e^{-\frac{x}{10{,}41608}} - 2\right]$$

1. — Construit aux frais de Mme Marguerite Boucicaut, propriétaire des Magasins du Bon Marché, née à Verjux.

2. — entre Gergy et Verjux, à 16km en amont de Chalon-sur-Saône.

3. — C'est une projection de chaînette.
Soient en effet :

$$\omega^{\frac{x}{a}} = e^{\frac{x}{m}} \quad \text{et} \quad \frac{b}{2r} = K \times \frac{m}{2}$$

l'équation devient :

$$y = K\frac{m}{2}\left[e^{\frac{x}{m}} + e^{-\frac{x}{m}} - 2\right] = KY'$$

Y' étant une chaînette de paramètre m.
Gauthey a profilé en chaînette le cerveau des voûtes, ou au moins de l'une des 5 voûtes du pont de Navilly sur le Doubs (1782-1790).
Cet emploi de la chaînette, ensuite abandonné et perdu, a été retrouvé et repris un siècle après, à 18km environ de Navilly, par un arrière-successeur de Gauthey. (Annales des Ponts et Chaussées, 1904, 3e trimestre : M. de Dartein : « *La vie et les travaux d'Emiland Gauthey* », p. 115 et 116).

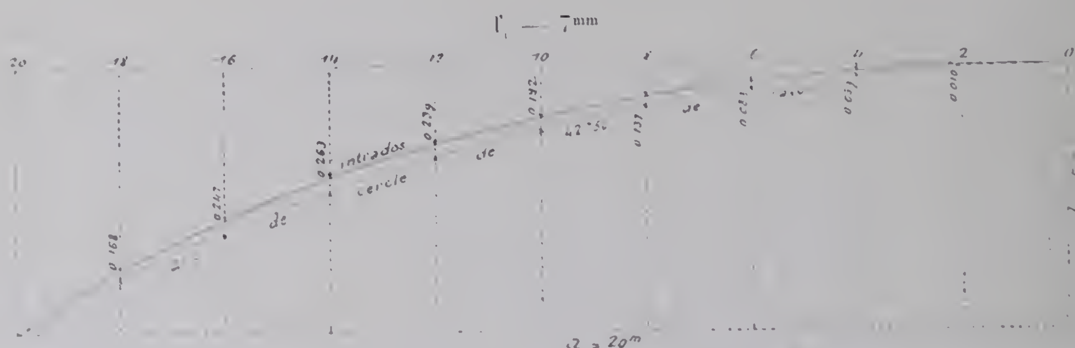
4. — On trouvera plus loin, dans ce Tome III, Livre II, comment ont été déterminés r et ω.

La chaînette proprement dite, – courbe d'un fil pesant, – de mêmes termes en e est :

$$Y = \frac{10,41608}{2}\left[e^{\frac{x}{10,41608}} + e^{-\frac{x}{10,41608}} - 2\right]$$

Ses ordonnées sont contractées dans le rapport $\frac{5,20804}{1,006486}$.

2. Renflement de l'intrados par rapport à l'arc de cercle de même portée et même montée.



Abscisses comptées à partir du sommet de l'arc	2m	4m	6m	8m	10m	12m	14m	16m	18m	20m
Ordonnées de l'arc de cercle de même portée et même montée.	0,047	0,189	0,426	0,760	1,193	1,729	2,372	3,127	4,000	5,000
Ordonnées de l'intrados	0,037	0,150	0,343	0,623	1,001	1,490	2,109	2,880	3,832	5,000
Différences (renflement)	0,010	0,039	0,083	0,137	0,192	0,239	0,263	0,247	0,168	0,000

L'écart maximum est de 0m263 à 14m de la clef (70/100 de la demi-portée).

L'arc de cercle a 12m50 de rayon. L'intrados adopté a un rayon de 53m90 à la clef, de 26m07 aux naissances : il retombe moins durement sur les piles.

3. Extrados. — « *L'arc d'extrados a ses ordonnées, par rapport à* « *l'horizontale tangente au sommet, proportionnelles à celles de l'arc d'intrados,* « *et dans le rapport* (S_1) :

$$\frac{y'}{y} = 0,919668$$

4. Pourquoi on a adopté des voûtes en projection de chaînette. — M. Tourtay[5] les justifie ainsi[6] :

« *1° On peut y tracer une courbe de pression qui passe à très peu près par les* « *milieux de tous les joints.....*

5. — La méthode de M. Tourtay est exposée plus loin dans ce Tome III, Livre II.

6. — Exposition, Paris, 1900. — Notices, Travaux Publics, p. 27 et 28.

« 2° *Cette courbe de pression moyenne ne sera pas, en général, réalisée avec les* « *procédés habituels de clavage et de décintrement; mais les autres courbes de pression* « *qu'on peut tracer, par exemple celle qui passe par le tiers supérieur du joint de clef et* « *par le tiers inférieur du joint de naissance, restent... dans la région moyenne de* « *la voûte. Dans la voûte en arc de cercle, au contraire, la courbe de pression se* « *rapproche plus ou moins de l'extrados vers les reins...*

Φ_1 (S_3)

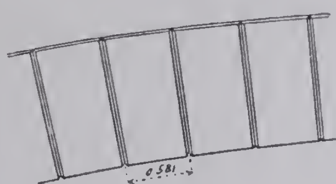


5. Pourquoi on a réduit l'épaisseur de la voûte. — « *L'épaisseur* « *des voûtes... (1m05 à la clef, 1m21 aux naissances) est sensiblement plus faible que* « *celle adoptée pour les grandes arches de dimensions comparables... Dans les* « *grandes arches surbaissées, on ne réduit pas sensiblement les pressions en* « *augmentant l'épaisseur au-delà d'une certaine limite...*

« *Ainsi la pression moyenne calculée à la clef, qui est de 19k 9 par centimètre* « *carré avec l'épaisseur de 1m05 adoptée, serait de 17k 3 avec une épaisseur de 1m50* « *et de 15k 8 avec une épaisseur de 2m* ».

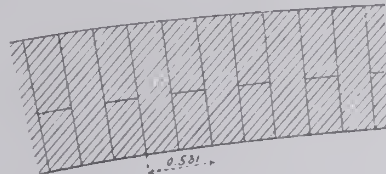
6. Appareil des voûtes.

f_1 — Bandeau



1cm5

f_2 — Corps



Demi-coupes en travers — 5^mm
à la clef d'une voûte | sur l'axe d'une pile

7. Tympans.

— Pour une hauteur maxima de plus de 5^m, ils ont seulement 0^m80 à la base, 0^m60 au sommet (f_6). Ils sont doublés par un mur en béton maigre (100^k de chaux hydraulique pour 1^mc de gravier).

L'intervalle entre les tympans est rempli de gravier : il n'est pas élégi.

Au projet de M. Tourtay, on a ajouté : dans les tympans, des médaillons portant le monogramme M. B. — ils sont petits et plats ; — aux extrémités, de maigres obélisques (S_3).

8. Couronnement.

— Le parapet en pierre de taille semble un peu lourd.

Comme à d'autres ponts en arcs très surbaissés, on y observe (mai et septembre 1909) des bosses sur les piles, des creux aux clefs des voûtes.

On regrette que ce grand pont n'ait pas un léger dos d'âne.

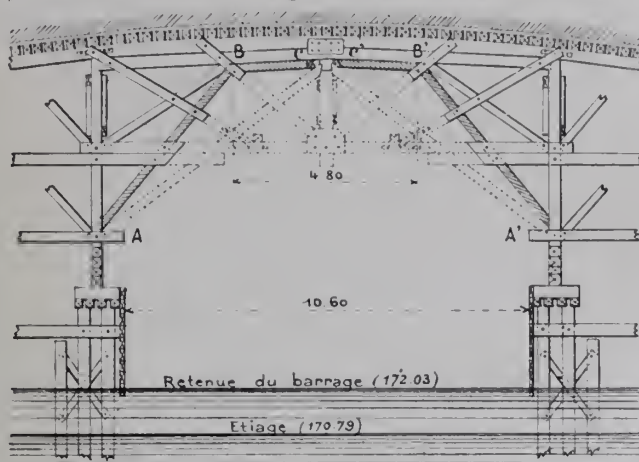
9. Cintres.

Cintre courant — 2^mm5

La voûte extrême rive droite avait un cintre marinier, avec passe de 10^m60 (f_9).

Pour satisfaire le Service de la Navigation, on dut plus tard agrandir cette passe, sous la voûte fermée (S_2).

f₉ – Cintre marinier. – Agrandissement de la passe – 5cm



Au dessin f_9, on a indiqué par des lignes ponctuées les pièces supprimées, par des hachures les pièces ajoutées AB, A'B', qu'on a serrées par les coins *cc'*.

Cette opération n'a provoqué aucun tassement (S_2).

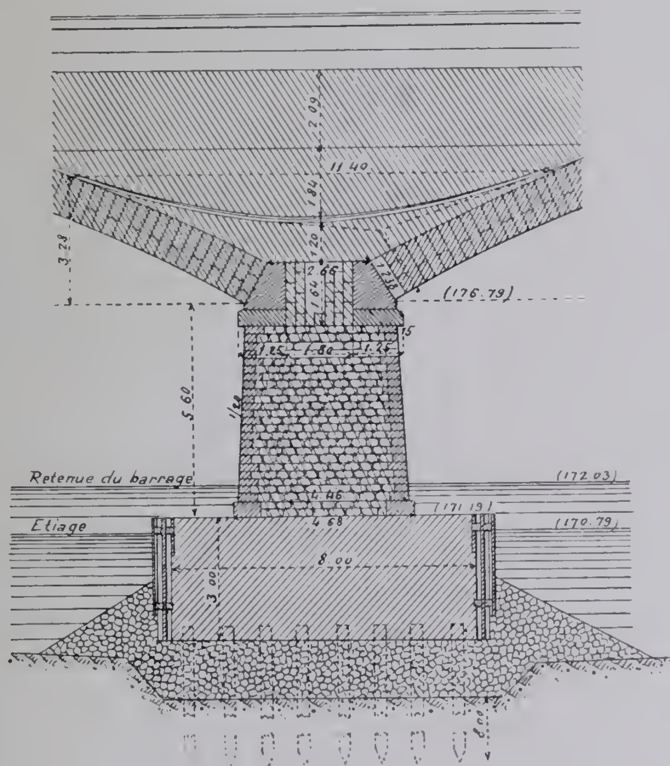
La voûte tassa plus tard de 44mm au décintrement.

10. Fondations. - *A. Piles.*

A l'emplacement de chaque massif, on a dragué, puis battu 136 pieux en sapin de 0m35, au mouton à vapeur Lacour de 1200k, tombant de 1m en moyenne, c'est-à-dire avec mouton lourd et petite chute [7].

On arrêtait le battage, soit quand la fiche sous le fond dragué atteignait 8m, soit quand le refus était de 4mm seulement par volée de 10 coups avec 1m de chute.

f_{10} — Coupe en long d'une pile — 5mm



On a ensuite immergé entre les pieux des enrochements (f_{10}) sur une hauteur de 2m à la pile 1, 1m50 à la pile 2, 1m à la pile 3. Il n'y en a pas sous la pile 4.

Les pieux furent recépés à 0m50 au-dessus des enrochements : puis on échoua sur eux un caisson sans fond de 17m de long, 8m de large, 4m20 de hauteur, dont le bordage était calfaté à sa partie supérieure sur 0m60.

Dedans, on immergea du béton par couches d'au moins 40cm, au moyen d'un tube en planches à débit continu [8], de 0m40 de côté.

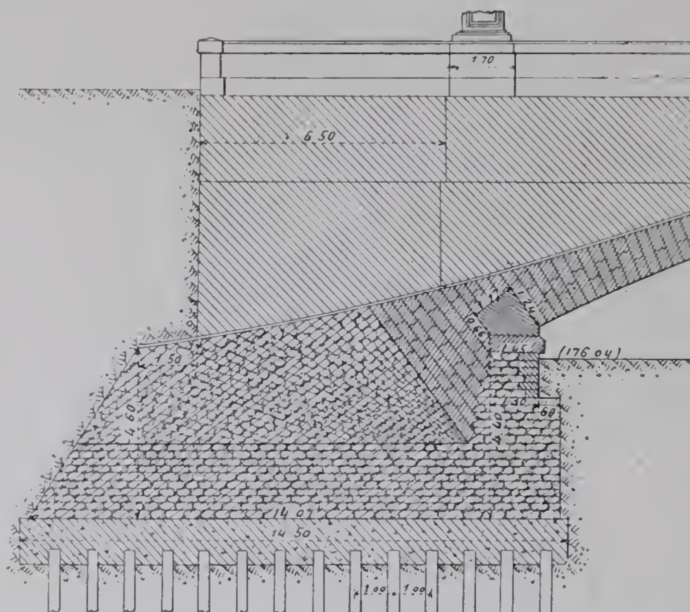
7. — Sur 1179 pieux, on n'en a cassé que 2. Dans un battage d'essai, on en avait cassé 3 sur 7 avec un mouton de 600k tombant de 5m20.

8. — Annales des Ponts et Chaussées, 1885, I, p. 776 à 780 : « *Note sur un procédé simple pour couler* « *le béton sous l'eau* », M. H. Heude, Ingénieur des Ponts et Chaussées.

On coula à chaque pile 400^{mc} de béton (70^{mc} à 80^{mc} par jour).

B. Culées.

f_{11} — Coupe en long d'une culée — 5^{mmm}



11. Exécution des voûtes. — Elles ont été construites à pleine épaisseur en 6 tronçons menés de front : aux naissances, sur coffrages ; plus haut, sur taquets au sommet des poteaux du cintre.

On clava à partir de la clef.

Au moment où on allait claver la voûte 2 (f_1), les têtes des palées supportant le cintre, qui n'avaient peut-être pas été battues bien verticalement, se déplacèrent dans le sens longitudinal, de la pile 1 vers la pile 2, sous les fermes qui, au-dessus des coins, n'avaient pas bougé. Le déplacement atteignit 14^{cm} à la ferme aval.

On étrésillonna les palées entre elles et sur les piles.

Au cintre de la voûte 4, l'ensemble des pieux commençant à se déplacer transversalement, on battit, à quelques mètres de chaque palée en mouvement, un pieu vers la base duquel on appuya une contrefiche coincée à la partie supérieure de la palée.

12. Décintrement. — On dégageait, au moyen de deux vérins, chaque paire de coins en chêne supportant les montants verticaux ; 1/6 de tour de vérin produisait un abaissement de 2^{mm} (48 vérins par voûte).

A. Voûte 1 *(sur cintre marinier).* — Pour satisfaire le Service de la Navigation, alors que les voûtes 1 et 2 étaient seules chargées, les 3 autres étant fermées

sur cintre, — mais non chargées, — on décintra la voûte 1. Elle n'était pas assez contre-butée et tassa de 44^{mm}, « *abaissement... anormal* » (S_1).

Quelques voussoirs de tête, aux naissances, furent légèrement épaufrés à l'intrados.

B. Voûtes 2 à 5. — « *Les 4 autres voûtes ont été décintrées ultérieurement* « *ensemble,... le pont... complètement chargé jusqu'au niveau de l'extrados...*

« *On a d'abord desserré les coins aux voûtes n°s 2, 3, 4 et 5, en y portant succes-* « *sivement les verrins; on a alors décintré la voûte n° 5 complètement, au moyen* « *des verrins. Pour les autres voûtes n°s 2, 3 et 4, les coins étaient suffisamment* « *desserrés pour qu'on pût, en les frappant à petits coups sans attendre qu'ils se* « *resserrassent, mener simultanément ou à très peu près, le décintrement des trois* « *voûtes (S_1).*

13. Mouvements observés.

Tassements en mm [9]			Piles N°s 1	Voûtes N°s 2	Pile 2	Voûte 3	Pile 3	Voûte 4	Pile 4	Voûte 5	Culée R G
Date du dernier clavage				19 oct. 1889		10 nov. 1889		2 déc. 1889		30 mars 1890	
Nombre de jours sur cintre				229 j		207 j		185 j		67 j	
au décintrement (5 juin 1890) *Tympans montés au niveau des extrados.*	totaux (des clefs des voûtes) [10]	T_0		**13**^{mm}		**18**^{mm}		**11**^{mm}		**14**^{mm}	
	partiels	Piles seules : t_p^0	**5** mm		**5** mm		**5** mm		**5** mm		**0**
	partiels	Voûtes seules : $t_v^0 = T_0 - \frac{t_p^0 + t_{p+1}^0}{2}$		8		13		6		11	
augmentation de tassement, du décintrement (5 juin 1890), au 11 octobre 1890. *Ouvrage livré à la circulation le 24 août 1890.*	totaux (des clefs des voûtes)	ΔT		20		22		20		31	
	partiels	Piles seules : Δt_p	**5**		**5**		**3**		**4**		**0**
	partiels	Voûtes seules : $\Delta t_v = \Delta T - \frac{\Delta t_p + \Delta t_{p+1}}{2}$		15		18		16		29	
le 11 octobre 1890.	totaux (des clefs des voûtes)	$T = T_0 + \Delta T$		**33**		**40**		**31**		**45**	
	partiels	Piles seules : $t_p = t_p^0 + \Delta t_p$	10		10		8		9		0
	partiels	Voûtes seules : $t_v = t_v^0 + \Delta t_v = T - \frac{t_p + t_{p+1}}{2}$		23		31		22		40	

9. — S_1, Note additionnelle, p. 477, 478. — Dans sa note : « *Détermination des pressions réelles dans* « *les voûtes surbaissées en forme de chaînette* » (Annales des Ponts et Chaussées, 1888. — 1, p. 565 à 636), M. Tourtay trouvait un tassement de 16^{mm} ou 27^{mm} avec un coefficient d'élasticité de 1×10^9 ou 0.6×10^9

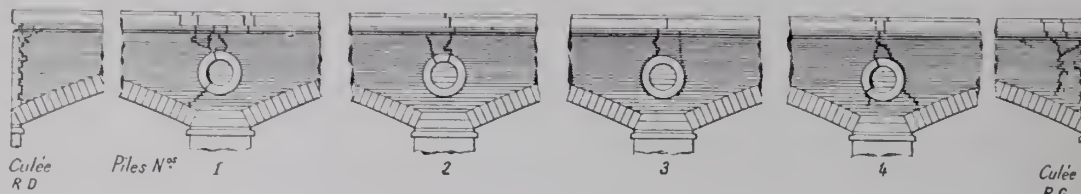
10. — Les chiffres gras sont les tassements mesurés.

A partir du 11 octobre 1890, les voûtes tassèrent encore de 6 à 8mm, probablement sous l'influence de la température. Le 13 mai 1891, elles étaient revenues à la position du 11 octobre 1890 [11].

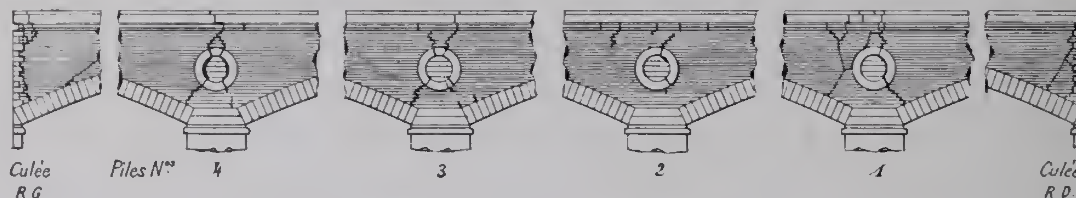
En mai 1909, on observait dans les tympans, au droit des piles, de minces fissures [12] (f_{12}, f_{13}) comme dans presque tous les ponts en arc très surbaissé.

Fissures dans les tympans

f_{12} — Tête aval — 2mm

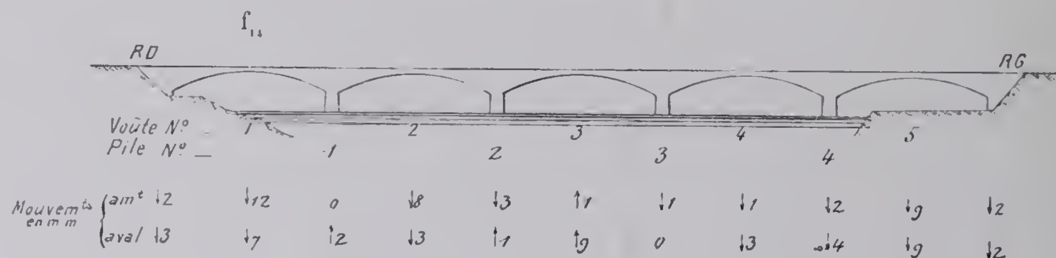


f_{13} — Tête amont — 2mm



Aucune de ces fentes ne se continue dans les voûtes.

Voici les mouvements au-dessus des clefs et des appuis, entre le 28 mai et le 14 décembre 1909 [12] : (abaissements ↓, relèvements ↑)



14. Personnel.

Ingénieurs :

Projet : M. Tourtay, Ingénieur des Ponts et Chaussées ;

Exécution : M. Jozon, Ingénieur en chef ;

M. Tourtay, Ingénieur ordinaire.

Entrepreneur : M. Bruno.

11. — S_1. Note additionnelle, p. 477.

12. — Observations de M. Bouteloup, Ingénieur des Ponts et Chaussées, à Chalon-sur-Saône.

SOURCES :

S_1. — Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1892, p. 445 à 497, Pl. 29 : « *Notice sur la* « *construction du Pont Boucicaut* ». M. Tourtay.

S_2. — Renseignements qu'a bien voulu me communiquer M. Tourtay.

S_3. — Ce que j'ai vu — mai 1909.

Tout ce qui n'est pas spécifié d'une autre source est de S_1.

PONT SUR LA MOSELLE, A MEHRING *(ALLEMAGNE, - Prusse-Rhénane)*

Route du village à la station [1]

1903-1904 — $\overline{\mathbf{A}}^{n}\,\mathrm{r}^{le}\,(>\,40^{m})^{3}$

Φ_1 — amont (S_2)



1. Matériaux. — Sauf les parements des avant-becs, qui sont en granit, tout est en béton, même les trottoirs et leurs bordures.

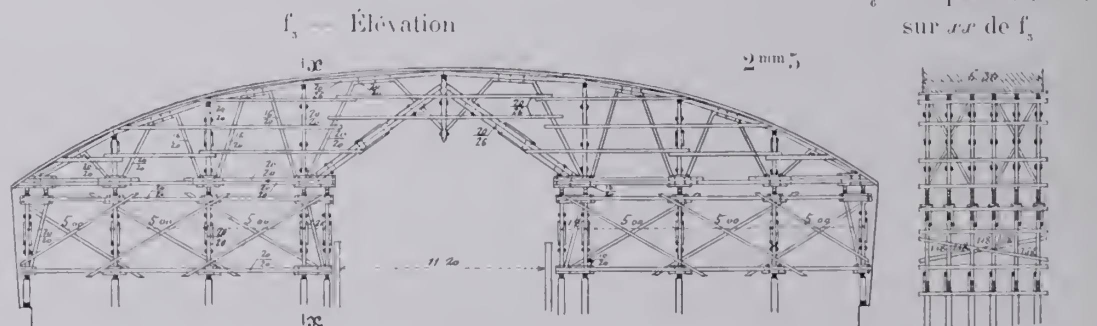
Sur les arrière-becs, on a dessiné des assises.

Pour l'aspect, on peut critiquer les dièdres de béton des retombées (r de f_2).

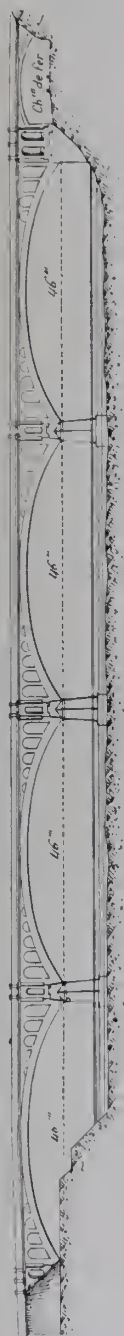
2. Cintre marinier.

f_5 — Élévation

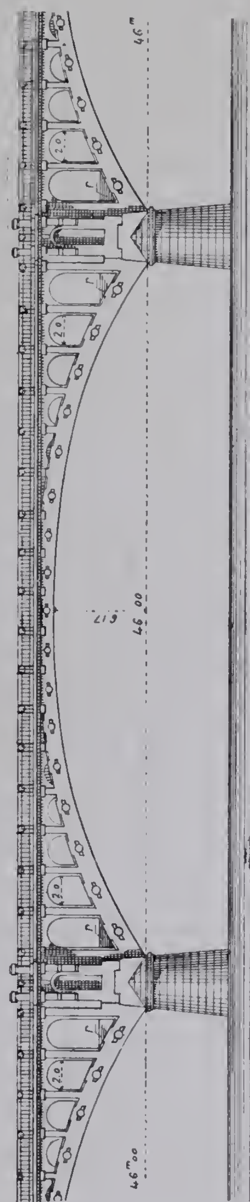
f_6 - Coupe en travers sur xx de f_5



1. — Chemin de fer d'intérêt local de Trèves à Bullay (Moseltalbahn), à $17^{k}4$ de Trèves. — Le pont est à 100^{m} en amont de la station.

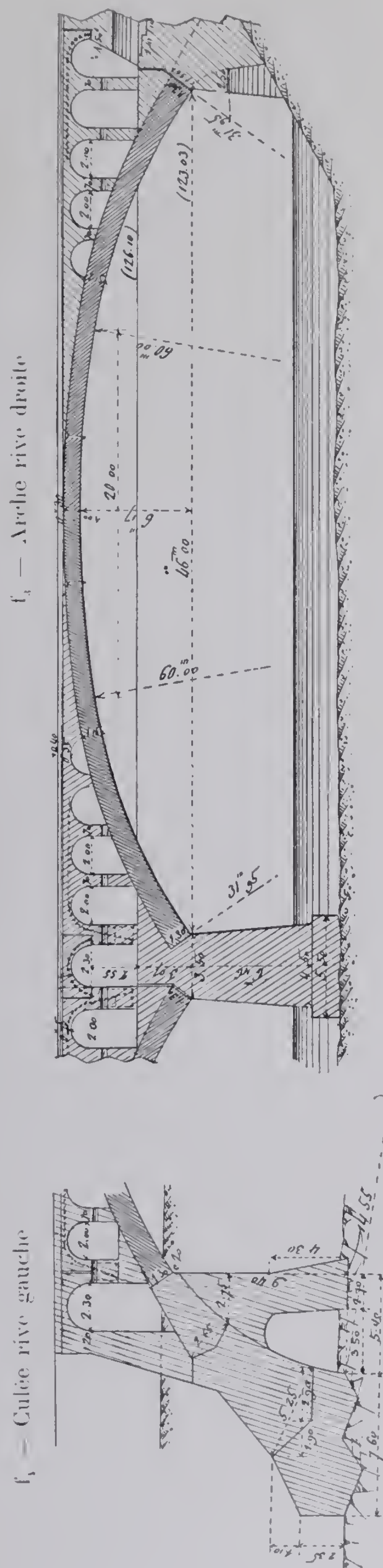


f_1 — Ensemble, amont — $0^{mm}75$



f_2 — Une grande arche — 2^{mm}

Coupes en long — $2^{mm}5$



f_3 — Arche rive droite

f_4 — Culée rive gauche

3. Dates.

Commencement des travaux		1er novembre 1903
Achèvement des piles		1er juillet 1904
Grandes voûtes (de la rive droite à la rive gauche)	1er-6	août 1904
	7 - 12	
	18 - 23	
	13 - 20	
Décintrement		8 octobre 1904
Ouverture à la circulation		1er janvier 1905

4. Personnel.

— *Projet et Entreprise* : MM. B. Liebold et Cie, d'Holzminden.

Direction des Travaux : M. Treplin, « Baurat » à Trèves.

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution (S'_1) et renseignements (S''_1), gracieusement communiqués par M. B. Liebold, en octobre 1910.

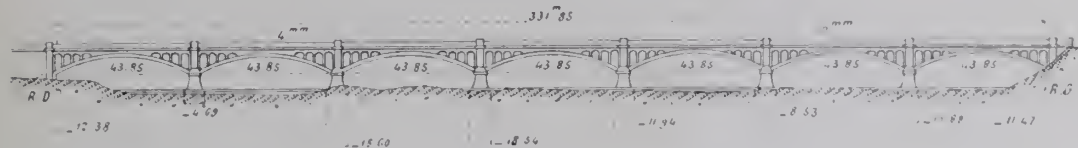
S_2. — Ce que j'ai vu — septembre 1910.

PONT SUR LA LOIRE, A ORLÉANS [1] *(LOIRET)*

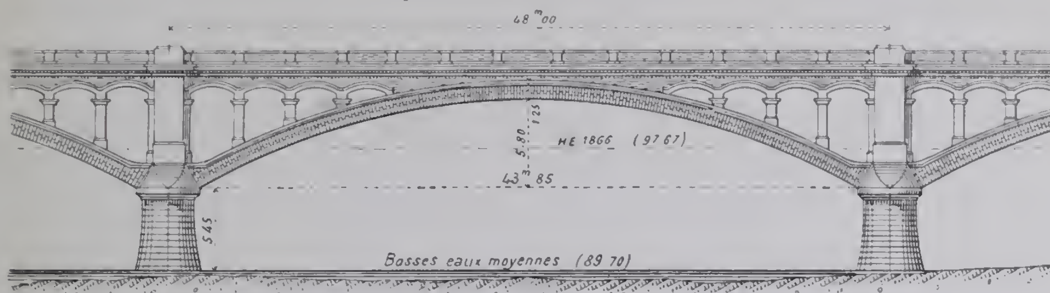
Route nationale n° 152 de Briare à Angers

1904-1906 **Ā**ⁿ rᵗᵉ (> 40ᵐ) 4

f_1 — Ensemble, aval — $0^{mm}4$



f_2 — Une arche — 2^{mm}



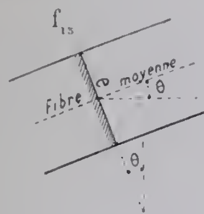
1. Déclivités. — A partir du milieu du pont, la chaussée est en pente de 10^{mm} vers la première voûte rive gauche, de 4^{mm} vers la culée rive droite ; ces deux pentes sont raccordées par une parabole de 48^{m} de corde (S_1, S_2).

Les 7 arches ont la même portée et la même montée (S_1).

Les naissances de deux arches voisines sont à des niveaux différents : les piles ont des hauteurs inégales (S_2).

2. Intrados. — Par rapport à l'arc de cercle de même portée et de même montée, l'intrados est cambré suivant une projection de chaînette [2], comme l'indique ce tableau (S'_1) :

Abscisses à partir du sommet		$11^m 836$	$13^m 803$	$15^m 766$	$17^m 726$	$19^m 682$
Ordonnées	de l'arc de cercle	1,609	2,203	2,898	3,697	4,608
	de l'intrados	1,505	2,082	2,771	3,582	4,527
Différences		*0m 104*	*0m 121*	*0m 127*	*0m 115*	*0m 081*



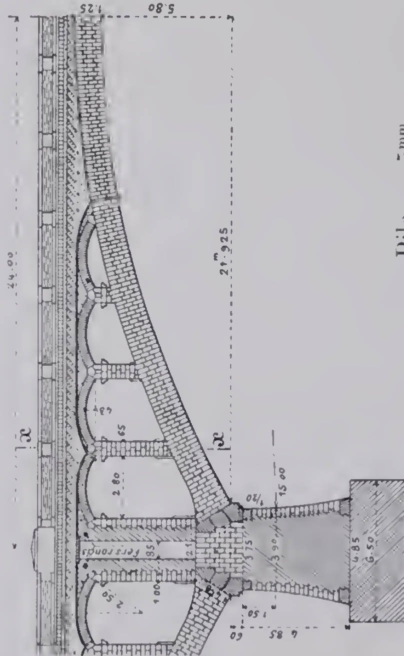
3. Epaisseur de la voûte. — L'épaisseur e de la voûte au point où la fibre moyenne est inclinée de θ sur l'horizon (f_{13}) est $\dfrac{e_0}{\cos.\ \theta}$.

La pression moyenne par unité est ainsi à peu près constante dans la voûte [3].

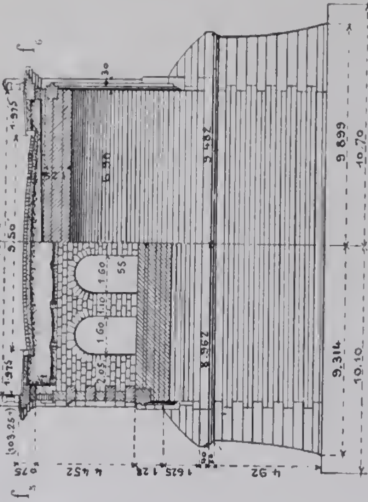
1. — au droit du Boulevard des Princes.

2. — appelée « *caténoïde* » par l'auteur du projet (Annales des Ponts et Chaussées, - 1900, - 4ᵉ trimestre : « *Mémoire sur le tracé et le calcul des voûtes en maçonnerie* », M. Legay).

3. — Voir plus loin, Tome III, Livre II.



f_3 — Coupe en long sur l'axe — 3^{mm}



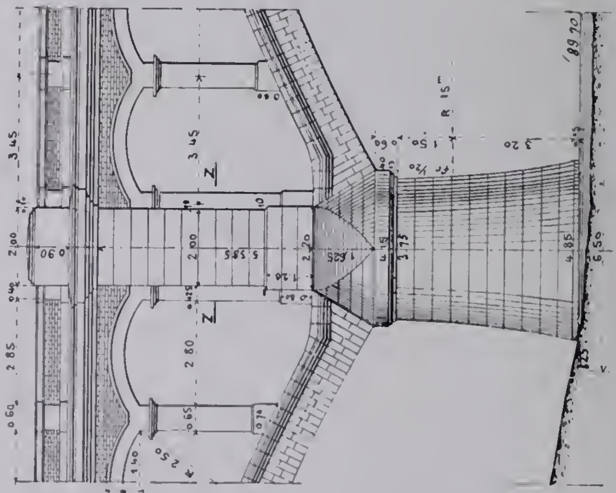
Demi-coupes en travers — 3^{mm}
sur xx de f_3 à la clef

f_5 f_6

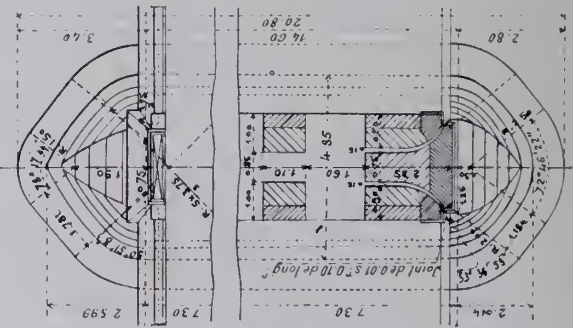


f_4 — Coupe en long de la culée rive gauche — 3^{mm}

Pile — 5^{mm}

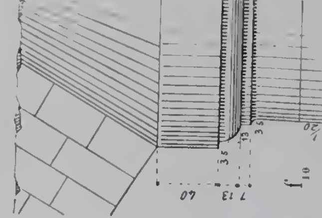


f_7 — Élévation



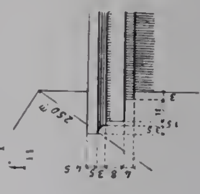
f_8 — Demi-plan par-dessus

f_9 - Coupe horizontale sur zz de f_7



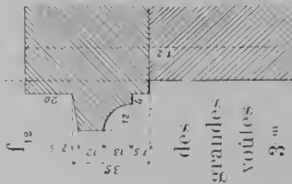
Chaperon — 2^{cm}

f_{10}



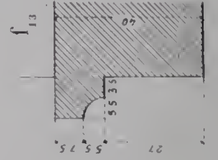
Cordon des petites piles — 3^{cm}

f_{11}

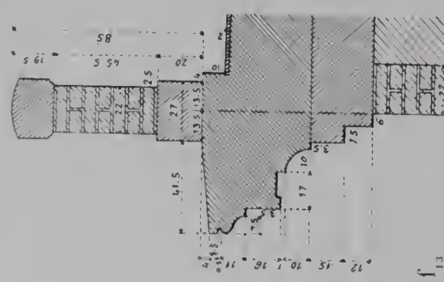


Archivoltes

f_{12} des grandes voûtes 3^{cm}



f_{13} des voûtes d'évidement 5^{cm}



f_{14} - Couronnement - 3^{cm}

4. Piles. — Comme au pont de Charrey [1], les becs sont en ogives persanes, et les retombées des voûtes s'appuient sur le couronnement, qui est en saillie de 0m20 (f'_{10}).

Par suite, l'ouverture réelle de chaque arche est : 43m85 + 2 × 0m20 = 44m25 [5].

L'épaisseur des piles se réduit à : 4m15 — 2 × 0m20 = 3m75 (f_1).

Les chaperons sont imités du pont de Homps sur l'Aude (1781-1788) [6] (S_2).

Φ_1 — aval (S''_1)



5. Tympans. Couronnement. Aspect. — La corniche est empruntée aux pilastres du pont de Navilly sur le Doubs (1782-1790) [7] (S_2).

Les tympans sont en briques ; elles y font bon effet.

Sur ce pont léger, le parapet plein, avec ses dés en pierre de taille, paraît un peu lourd.

4. — Annales des Ponts et Chaussées, 1893, 2e semestre, p. 737 et suivantes : « *Notice sur le grand « pont en maçonnerie construit sur la Saône à Charrey* », M. Mocquery, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées (5 arcs de 30m au 1/8e).

5. — Aux culées, le couronnement n'est pas en saillie : l'ouverture des arches de rive est 43m85 + 0m20 = 44m05.

6. — M. de Dartein. Études sur les Ponts en pierre remarquables par leur décoration. Ponts français du XVIIIe siècle, volume III. — Languedoc. Paris, Béranger, 1908, p. 173 à 184, Pl. 41 à 44. « *Le Pont « de Homps sur l'Aude* ».

7. — id. —, vol. IV. — Bourgogne, p. 173 à 189, Pl. 23 à 30. « *Le Pont de Navilly sur le Doubs* »

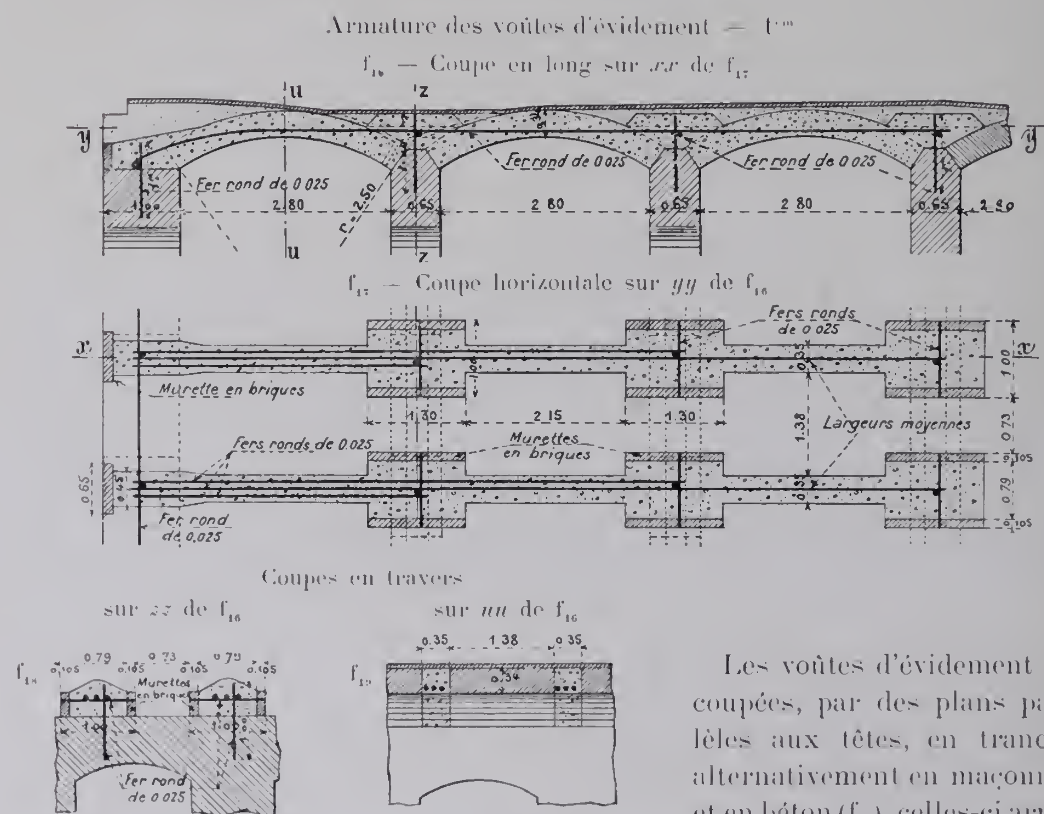
Il y a, à 660^{m} en amont, un fort beau pont du XVIIIe siècle [8], vigoureux, robuste, solide.

Très sagement, on a traité le nouveau de façon tout opposée : ce pont léger, presque trop, à lignes fines, presque menues, fait un heureux contraste avec la lourde masse du vieux pont.

6. Dispositions pour permettre, sans fissures, les mouvements des tympans dus aux variations de température. — En s'abaissant par le froid, les grandes voûtes entraînent avec elles leurs tympans, d'où fissure inévitable au-dessus de la pile, point fixe.

Il fallait donc l'accepter, la cacher, et, en même temps, contre-buter la poussée de la dernière voûte d'évidement.

Voici le très judicieux dispositif adopté (S_{7}) :



Les voûtes d'évidement sont coupées, par des plans parallèles aux têtes, en tranches, alternativement en maçonnerie et en béton (f_{19}), celles-ci armées de fers longitudinaux qui absorbent la poussée de la dernière voûte (f_{16} à f_{19}).

Entre la demi-pile du viaduc d'évidement et le pilastre, est ménagé, jusqu'au parapet, un vide masqué en élévation par le pilastre qui, lui, est fixe comme la pile (f_{9}).

C'est le premier grand ouvrage français en maçonnerie où l'on ait assuré le jeu de la dilatation.

8. — 1751-1760. — 9 arches en anse de panier à 3 centres. Arche centrale de 100 pieds ($32^{m}48$) d'ouverture, 28 pieds ($9^{m}10$) de montée ; arches de rive de 92 pieds ($29^{m}89$) d'ouverture, 25 pieds ($8^{m}12$) de montée. — Largeur entre têtes : 46 pieds ($14^{m}94$). — Longueur entre culées : 166 toises, 4 pieds ($324^{m}84$). — Projet de Hupeau, adjugé le 29 mars 1751. — On a mis 4 ans à le fonder, 4 ans à faire les voûtes, 2 ans à l'achever. — Livré au public fin 1760. — Fondé, après épuisements dans des batardeaux, sur pilotis et grillage. Les fondations ont été fort difficiles. — On en lira la description avec intérêt et profit.

Perronet *Description des Projets et de la Construction des Ponts de Neuilly, de Mantes, d'Orléans et autres*, » Tome second, Paris, Imprimerie Royale, MDCCLXXXIII, « *Pont d'Orléans* », p. 1 à 24, Pl. XXXI à XXXIX

7. Pressions par $\overline{0^m01^2}$ (S'_1).

A. – Dans les voûtes :

			à l'intrados	sur la fibre moyenne	à l'extrados
Sous la charge permanente seule		Clef	11^k04	18^k90	26^k76
		Retombées	33^k92	18^k90	3^k88
Sous une surcharge de 500^k mq, couvrant	toute la voûte	Clef	11^k99	20^k53	29^k07
		Retombées	36^k84	20^k53	4^k21
	les 4/5 de la 1/2 portée à partir de l'appui (Position la plus défavorable)	Clef	9^k80	19^k71	29^k62
		Retombées [9]	39^k46	19^k57	-0^k32 tension

B. – Dans la 2e pile rive droite (où les fondations sont les plus profondes).

	sous le couronnement	à la base de la pile	sur le sol de fondation, Pression calculée sur 1^m de largeur	sur le sol de fondation, Pression calculée sur toute la largeur
Sous la charge permanente	8^k87	7^k96	10^k44	9^k01
Sous une surcharge de 500^k/mq couvrant les 2 demi-voûtes	9^k51	8^k48	10^k83	9^k40

C. – Sur le sol de fondation, sous la culée rive gauche (sans tenir compte de la poussée des terres).

	moyenne	maxima
Sous une surcharge de 411^k/mq couvrant la voûte rive gauche	8^k64	17^k28

8. Cintres. — Pour les 5 arches à partir de la rive gauche, on adopta le type des cintres du pont de Tolbiac à Paris (1879-1882) [10] (S_2).

Cintre des 5 arches à partir de la rive gauche — $2^{mm}5$

f20

Sous les cintres des deux voûtes extrêmes de rive droite, on ménagea une passe libre de 9^m, pour faciliter le passage des glaçons (S_2)

Cintres des deux arches de rive droite — $2^{mm}5$

f21 f22

9. — Avec l'épaisseur à la clef portée de 1^m25 à 1^m40, ces trois efforts étaient : 38^k08, 18^k38, -1^k32. On diminuait donc très peu la compression, et il y avait plus de tension. — Avec l'épaisseur réduite à 1^m10, les trois efforts étaient : 41^k48, 21^k03, 0^k58. On avait un peu plus de compression et pas de tension. — Il y aurait eu intérêt à réduire l'épaisseur à 1^m10. On a mis 1^m25 « *moins par prudence que par des considérations d'esthétique* » (S'_1).

10. — 5 ellipses de 29^m10, 32^m15, 35^m20.

A la première arche (rive droite), la fiche des pieux varia de 1^m50 à 3^m ; à la deuxième, elle atteignit 10^m. Pour les autres, les pieux furent presque tous entés, quelques-uns eurent 3 entures et une fiche de plus de 20^m. Pour quelques-uns, on se contenta d'un refus de 5^{mm} (mouton de 700^k tombant de 1^m50 à 1^m80). Quand on ne l'obtenait pas, on battait à côté un autre pieu (S_2).

9. Fondations (S_2). — De janvier 1904 à janvier 1905, soit en moins d'un an, les 8 caissons furent descendus à l'air comprimé de 4^m69 à 18^m60 sous l'étiage, sur marne blanche supportant de 15^k à 20^k par $\overline{0^m01}^2$.

Pour atteindre la marne, on avait à traverser des couches calcaires avec veines de tuf ou de silex, et quelques cavernes.

A la culée rive droite, on dut abandonner la descente du caisson, à cause de la déformation de ses parois [11]. On refoula l'eau à 0^m80 au-dessous du couteau en forçant la pression, et on battit dans les poches des pieux en sapin de 1^m80 de hauteur, 0^m15 de diamètre, espacés de 0^m50 d'axe en axe ; puis on nettoya ces poches, et on les remplit de béton ou de sacs de ciment quand on ne pouvait épuiser.

Le béton étant arasé au niveau de la tête des pieux, on le recouvrit de deux planchers superposés de rails disposés à angle droit, qu'on noya dans du béton de ciment.

10. Exécution des voûtes. — *A. Dates.* — Le devis prescrivait de construire en même temps les 7 voûtes (S_2).

Voici les dates d'exécution (S_3) :

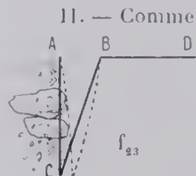
Voûte	1 (rive dr.)	2	3	4	5	6	7 (rive g.)
Commencement....	30 oct. 1905	7 nov. 1905	18 sept. 1905	18 juil. 1905	10 nov. 1905	17 sept. 1905	6 mars 1906
Fin.......	17 mars 1906	27 mars 1906	5 avril 1906	5 mai 1906	7 mai 1906	17 mai 1906	23 mai 1906

B. Joints secs. — Les voûtes furent exécutées avec toute leur épaisseur [12], (3 moellons en général), en 4 attaques.

On ménagea des joints secs au-dessus de tous les poteaux du cintre.

A l'intrados, les moellons à sec de douelle étaient posés, — non sur les lames de plomb prévues, parce que trop difficiles à enlever, — mais sur de petites cales en chêne de $30^{mm} \times 25^{mm}$ de côté, 12^{mm} d'épaisseur, maintenues par des liteaux en sapin de 25^{mm} de hauteur et 8^{mm} d'épaisseur, placés sur le cintre ; à l'extrados, ils étaient tenus par des coins en chêne.

11. — Comme aux ponts Alexandre III, de Passy,... la tôle du plafond DB, au lieu de se continuer en BA, était pliée le long de BC. La crinoline ACB était remplie de béton par en haut avant le fonçage. La paroi AC a rencontré de grosses pierres qui l'ont déformée.



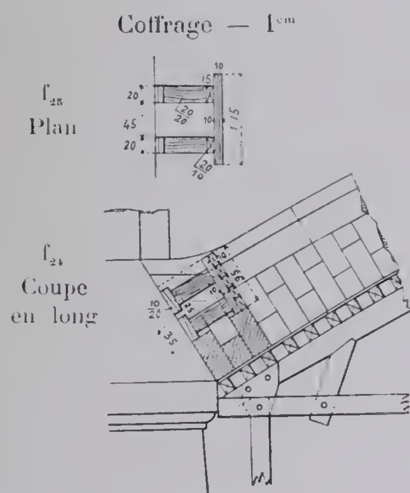
12. — On a craint que la construction par rouleaux n'abaissât la courbe de pression, déjà basse dans ces voûtes très tendues (S''_1).

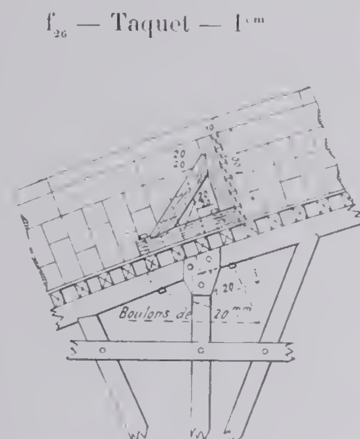
Les tronçons des naissances étaient soutenus à l'extrados par des coffrages, à l'intrados, par 3 moellons dont 2 à sec (f_{24}).

Φ_2 — Exécution d'une voûte (S'₅)



Les tronçons des reins reposaient sur des taquets fixés au-dessus des troisièmes poteaux du cintre à partir des naissances (f_{26}, Φ_2).





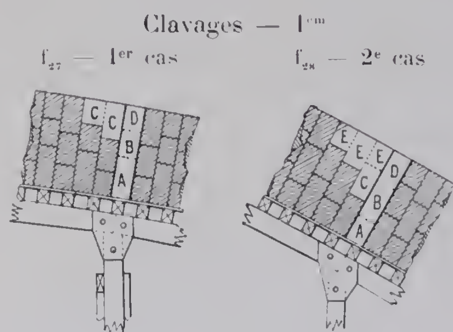
Les joints secs furent remplis de sable aux 5 premières voûtes, — laissés vides aux deux dernières, sauf ceux des naissances : des sacs les garantissaient à l'extrados.

Toutes les assises étaient posées en douelle sur liteaux, pour permettre le rejointoiement.

A la voûte extrême rive droite, une fissure s'ouvrit entre la clef et le premier poteau du cintre, due au fléchissement du vau de la passe.

A la voûte voisine, également sur cintre retroussé, on ménagea là un joint sec.

C. Clavages (S_2). — On clava, à partir de la clef, en matant au refus, par petites épaisseurs, du mortier à 600^k à l'état de sable humide. On termina par les naissances, laissées ouvertes jusqu'au dernier moment.



Dans les deux cas indiqués aux croquis f_{27}, f_{28}, A est posé à sec en exécutant la voûte.

1er Cas (f_{27}). — On pose B, on le mate ; puis on pose C et D. On maçonne C à mortier ; 48 heures après, on mate D.

2e cas (f_{28}). — On pose B à sec ; on pose C sur mortier ; 48 heures après on mate B. On pose D à sec ; on maçonne E ; 48 heures après, on mate D.

On a clavé de la rive droite à la rive gauche.

D. Enlèvement des coffrages (S_2). — On enlevait les coffrages sur 3^m à chaque tête ; on maçonnait : on matait les joints en partant des têtes.

II. Décintrement (S''_1). — Au moment du premier décintrement, la voûte n° 7 était clavée depuis 6 jours.

On décintra d'abord les trois voûtes rive droite (nos 1, 2, 3), tout en desserrant progressivement les cintres des deux voûtes suivantes (n° 4, de $3^{mm}5$, – n° 5, de 2^{mm}), pour ne pas faire fléchir les piles ; puis, deux mois après, on décintra les 4 voûtes rive gauche.

Au premier décintrement, on opéra sur 4 palées seulement à la fois (36 boîtes à sable, 4 équipes de 9 hommes) ; au deuxième, sur 5 palées.

On n'a constaté ni fissure, ni épaufrement. Le tassement et le déplacement des piles ont été insignifiants.

Voici les conditions et les résultats de ces deux décintrements :

Décintrement	Voûtes	N° des voûtes	Âge moyen des maçonneries au début du décintrement	Nombre de jours après le dernier clavage	Décintrement — Séries successives d'abaissement des pistons (Dans les 1res, on enlevait le sable par descentes de 1mm; dans les dernières, par descentes de 2mm, puis plus.) 1re série	2e série	3e série [13]	4e série	5e série	6e série	Décollement aux têtes — Abaissement des pistons	Décollement aux têtes — Tassement de la clef	Décollement complet — Abaissement des pistons	Décollement complet — Tassement de la clef		Mouvements en mm observés après décintrement — Juin 1906 — 6 h. du matin — 1re	2	3	4	5	Remarques
1er Décintrement Mai 1906	Voûtes complètement décintrées en une fois	1 (R 0)	171 j	73 j	2mm	3mm	5mm	12mm	2 à 4mm		5mm	2mm	24 à 28mm	amont	8.7 mm	6.3	7.4	7.3	»	7.1	Jusqu'au 16 juin à la voûte 2, au 27 juin à la voûte 3, on a observé des oscillations diurnes de 1mm à la tête aval exposée à l'ouest.
														aval	7.4	6.6	7.9	8.6	»	7.9	
		2	161 j	63 j	2	3	5	12	2 à 4		5	2	24 à 28	amont	6.9	5.5	6.6	7.2	7.1	6.9	
														aval	6.2	5.5	6.1	6.6	6.7	6.5	
		3	210 j environ	54 j	2	3	5	16	2 à 4		5	2	28 à 32	amont	9.3	9.8	12.6	12.6	12.7	12.1	
														aval	7.3	8.1	11.8	13.1	12.4	11.5	
Du 29, à 5 h. 1/2 du matin, au 31, à 3 h. du soir	Voûtes décintrées en deux fois — Desserrage partiel	4	284 j	24 j	2	0.5		1 [14]						amont	[15] — 2.6	— 2.0	— 0.7	— 1.0	— 1.4	— 2.4	L'oscillation maxima pendant cette période a été de 2 à 3mm.
														aval	— 2.1	— 2.0	— 1.6	— 1.0	— 1.2	— 1.6	
		5	241 j	22 j (6e voûte 12 j, 7e 0 j.)	2									amont	— 0.8	— 0.5	— 0.6	— 1.0	— 0.9	— 0.2	
														aval	— 0.6	— 0.8	— 0.6	+ 1.0	+ 0.6	+ 0.6	
2e Décintrement Juillet 1906	Achèvement	4	340 j	80 j	»	»	3	4	5	»	6.5	2.5	12	amont	4.3 [16]						Pas de tassement après décintrement. Oscillations diurnes dues à la température. Le 30 juillet, relèvement général de 2mm dû à la chaleur.
														aval	2.1 [16]						
		5	297 j	78 j	»	2	3	4	5	2	4	2.5	16	amont	1.7 [16]						
														aval	1.1 [16]						
Du 21, à 5 h. 1/2 du matin, au 25, à 10 h. du matin	Voûtes complètement décintrées en une fois	6	139 j	68 j	2	2	3	4	5	2	5	2.5	16	amont	5.7						
														aval	4.3						
		7 (R 6)	103 j	62 j	2	2	3	4	5	4	5	2.5	18	amont	7.6						
														aval	7.3						

13. A partir de la 3e série, on diminuait les abaissements en se rapprochant des naissances. Les chiffres indiqués sont les abaissements au sommet du cintre.
14. Abaissement opéré pour remédier à un relèvement observé à la suite de la 3e série. — 15. Les nombres précédés de — sont des relèvements.
16. Abaissement constaté au 2e décintrement, et non différence du relèvement du 1er et de l'abaissement du 2e.

12. Dépenses (S_3).

	Fondations	Élévation	Ensemble
Entreprise	862.505f76	1.244.117f65	2.106.623f41 [17]
Régie	28.124f56	69.721f29	97.845f85
Dépenses générales (surveillants, etc)	17.981f01	26.525f21	44.506f22
Sommes allouées aux Entrepreneurs	13.850f63	29.108f34	42.958f97 [18]
Totaux	922.461f96	1.369.472f49	2.291.934f45 [19, 20, 21]

13. Personnel.

Ingénieurs
- en chef : M. Renardier.
- ordinaires
  - M. Levesque – *Choix de l'ouverture.*
  - M. Legay – *Projet définitif, Etudes de stabilité, Travaux.*

Entrepreneurs : MM. Dedeyn et Perchot (S_3).

17. — Decompte non accepté par les Entrepreneurs.

18. — Non compris les intérêts de 4760f59 que l'Etat doit payer à l'Entreprise.

19. — Non compris les frais d'expertise, dont une partie (2553f) est à la charge de l'Etat.

20. — Les prévisions (abords compris) s'élevaient à 2.430.000f
ainsi réparties :
à la charge de l'Etat, à forfait 1.075.000f
à la charge de la Ville : $\frac{2.430.000^f}{5}$ = ... 486.000f
à la charge du Département, le reste 869.000f
La Ville n'a voulu subventionner qu'un pont en pierre.

21. — Procès-verbal de la réception de l'ancien Pont, par Perronet. 1763 - 17 octobre et jours suivants :

	Livres	Sous
Adjudication du 29 mars 1751	2 084 000	
Augmentation	586 856	13
	2 670 856	13
Façade de la rue Royale d'Orléans	100 000	
Reste pour le pont et ses abords	2 570 856	13

Perronet. *loc. cit. renvoi* 8, p. 15, 16, 17, 18.

SOURCES :

S_1. — Dessins d'execution.
- S'_1. Mémoire technique, M. Legay, 5 février 1903.
- S''_1. — Note sur le décintrement, M. Legay, 10 septembre 1906.

S_2 — Génie Civil, 29 septembre 1906, p. 337 à 345. Pl. XXII : « *Nouveau pont en* « *maçonnerie sur la Loire à Orléans* » M. A. Dumas.

Renseignements qu'ont bien voulu me donner :
- S_3. — M. Renardier.
- S_4. — M. Legay.

S_5. — Ce que j'ai vu — juillet 1908.
- S'_5. — avril 1906.
- S''_5. — juillet 1908.

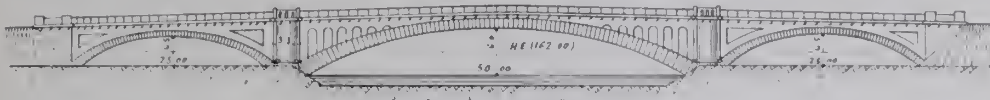
PONT SUR L'HOTZENPLOTZ, A KRAPPITZ

(ALLEMAGNE, – Silesie, – Cercle d'Oppeln)

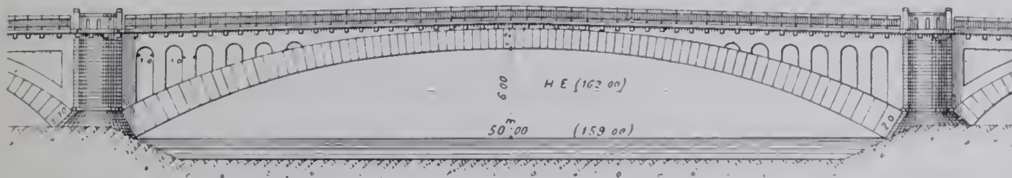
Route de Krappitz à Zyrodezütz

1905 — Ā^{n} I^{te} (> 40^{m},5)

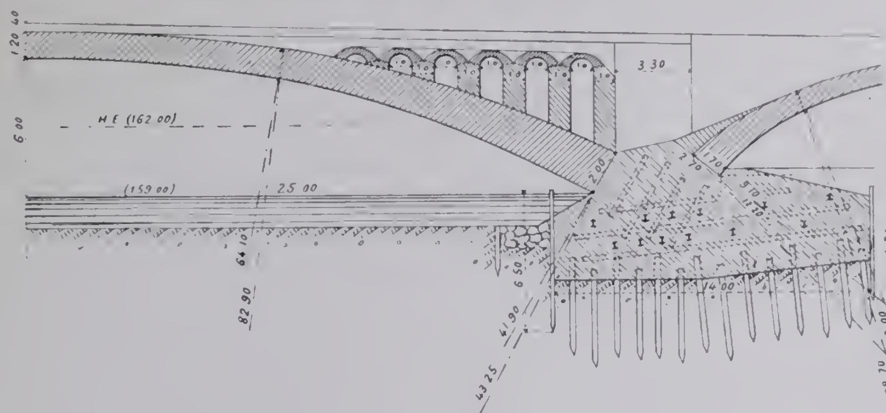
f_1 — Ensemble — 1^{mm}



f_2 — Grande voûte — 2^{mm}



f_3 — Coupe en long d'une pile et des demi-voûtes voisines — 3^{mm}



1. Personnel[1]. — *Projet :* M. Hirnschal, « Kreisbaumeister », à Oppeln. Entrepreneurs : MM. Liebold et Cie, de Langebrück (Saxe).

1. — Renseignements qu'a bien voulu me donner M. Hirnschal

Φ_1 (S_2)



SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution que m'ont gracieusement remis MM. Liebold, en 1908.

S_2. — Ce que j'ai vu, — juillet 1909.

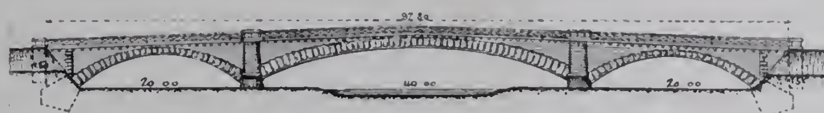
PONT SUR LA FREIWALDAUER BIELE, A **GROSS-KUNZENDORF**

(ALLEMAGNE, - Silésie, - Cercle de Neisse)

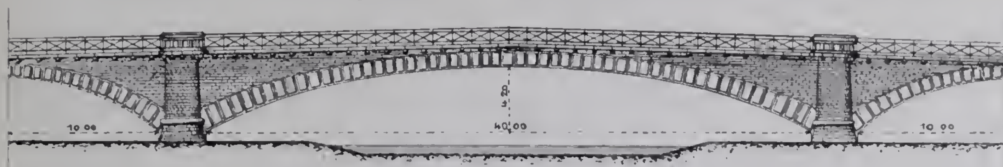
Route de Neisse à Gross-Kunzendorf

$\bar{A}^n$ I.te (= 40m)6

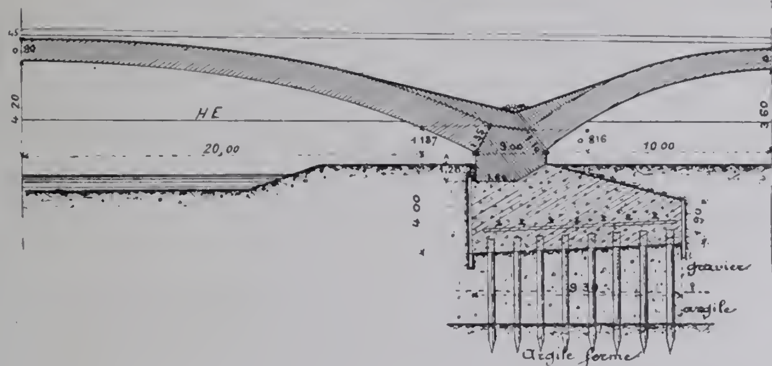
f_1 — Ensemble — 1mm



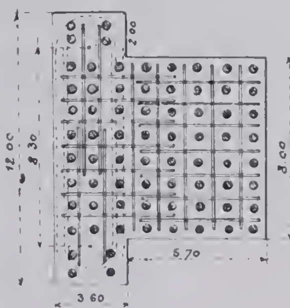
f_2 — Grande voûte — 2mm



f_3 - Coupe en long d'une pile et des demi-voûtes voisines - 3mm

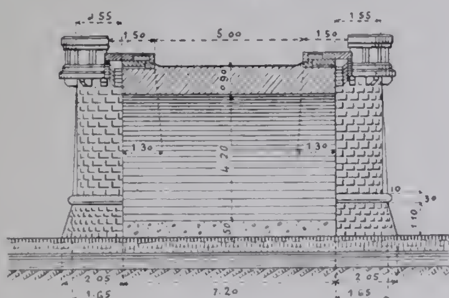


f_4 — Pilotis et armature de la pile - 3mm

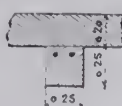


Couronnement — 2cm

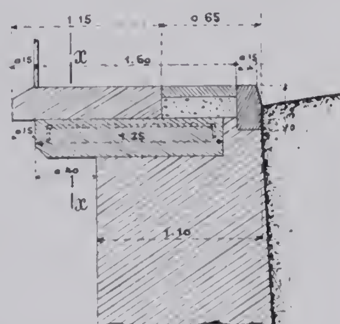
f_5 — Coupe en travers à la clef — 4mm



f_7 — Coupe sur *xx* de f_6



f_6 — Coupe en travers



I. Personnel. — *Projet et Entreprise :* MM. Liebold et Cie, de Langebrück (Saxe).

SOURCE :

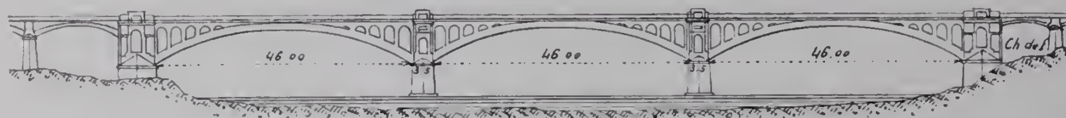
S_1. — Dessins d'exécution qu'ont bien voulu me remettre MM. Liebold, en 1908.

PONT SUR LA MOSELLE, A SCHWEICH[1] *(ALLEMAGNE - Prusse-Rhénane)*

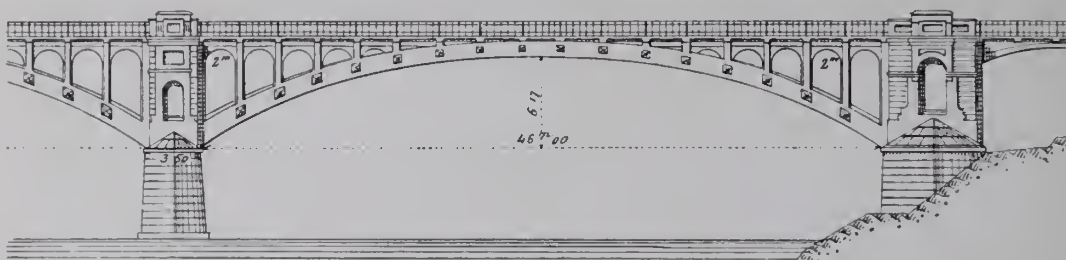
Route de Schweich à Trèves

1905-1906 $\bar{\mathrm{A}}^{n}\ \mathrm{r}^{te}$ (C = 40^{m})^{7}

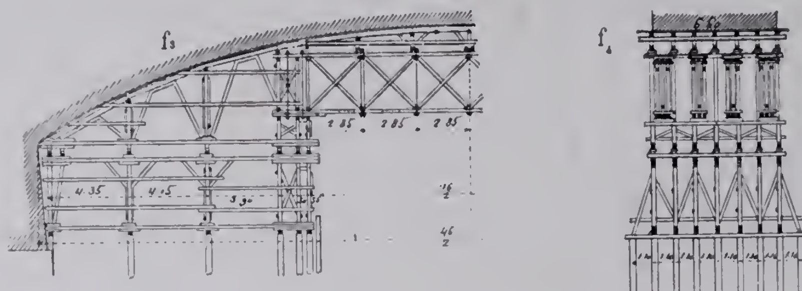
f_1 — Ensemble des grandes arches, amont — 0^{mm}75



f_2 — Une des grandes arches — 2^{mm}



Cintre de l'arche centrale — 2^{mm}5



1. Matériaux (S'_1). — Tout est en béton, sauf les parements des avant-becs qui sont en granit.

Au-dessus des naissances, les parements sont colorés en rouge.

2. Quelques observations. — On a réduit, aux têtes, l'épaisseur des voûtes.

Les trottoirs sont coupés au droit de chaque pile par deux joints de dilatation.

Un fer apparent protège les bordures en béton des trottoirs.

1. — Entre le village et la station du chemin de fer d'intérêt local de Trèves à Bullay (Moseltalbahn), à 10^{k}6 de Trèves. Le pont est à 50^{m} en amont de la station.

Φ_1 — aval (S_2)



3. Dates (S'_1).

Commencement des travaux		mai 1905
Piles et culées		juin – octobre
Grandes voûtes	rive droite	15 – 29 mai 1906
	centrale	fin juin – 7 juillet
	rive gauche	15-29 mai

Décintrement : 4 à 5 semaines après l'achèvement.

Ouverture à la circulation.............................. 10 octobre 1906

4. Personnel (S''_1). — *Projet et Entreprise :* MM. B. Liebold et Cie, d'Holzminden.

Direction des Travaux : M. Möhle, Ingénieur.

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution (S'_1) et renseignements (S''_1), gracieusement communiqués par M. B. Liebold en juillet 1910.

S_2. — Ce que j'ai vu — septembre 1910.

PONT SUR LE BRAS DROIT DU RHÔNE, DIT DE VILLENEUVE, A AVIGNON[1] *(VAUCLUSE)*

Route nationale n° 100 de Montpellier à Coni

1905-1909 $\bar{A}^{n}$; r^de^ ($\geq$ 40m) 8

Φ_1 (S_3)



1. Principales dispositions et dimensions. — Ce sont celles du pont Boucicaut[2] : même portée, même surbaissement, mêmes courbes d'intrados et d'extrados en projection de chaînette, mêmes épaisseurs des voûtes et des piles, même appareil, même mode d'exécution des grandes voûtes....

Les cordes des voûtes 3 à 9 (f_1) sont horizontales ; celles de rive (1, 2, 10) sont en rampe de 0m30 par arche.

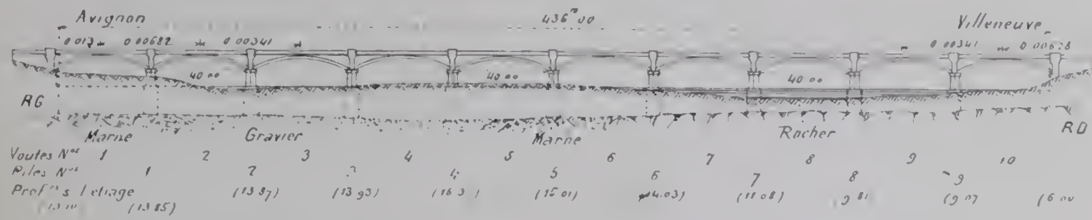
2. Piles. — Les arcades aveugles des pilastres et leurs corbeaux sont imités des remparts d'Avignon : les arcades semblent petites.

3. Trottoirs en encorbellement. — Les trottoirs et le garde-corps en fonte sont en encorbellement sur consoles en béton armé. La largeur disponible entre parapets est ainsi de 10m, pour 8m20 entre têtes.

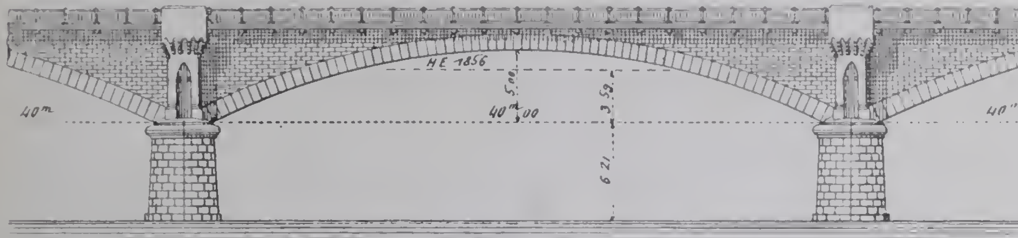
1. — A la place du pont en bois de 1809. On a maintenu la circulation pendant la construction, par une passerelle provisoire en bois, établie à 50m environ en amont.

2. — $\bar{A}^{n}$ r^te^ ($\geq$ 40m) 2 — Tome III.

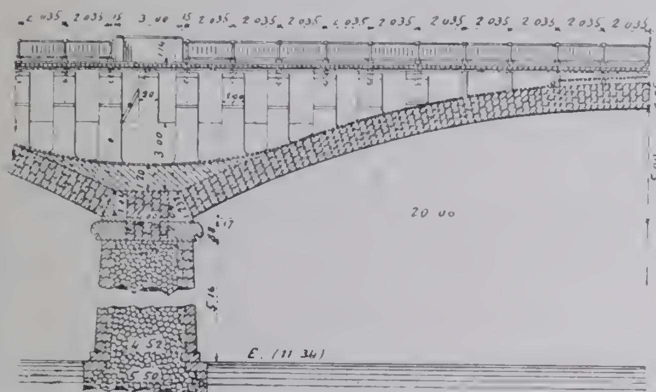
f_1 — Ensemble, amont — 0mm3



f_2 — Une voûte — 2mm

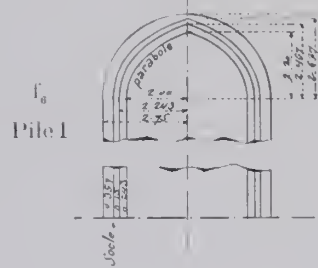


f_3 — Coupe en long — 3mm



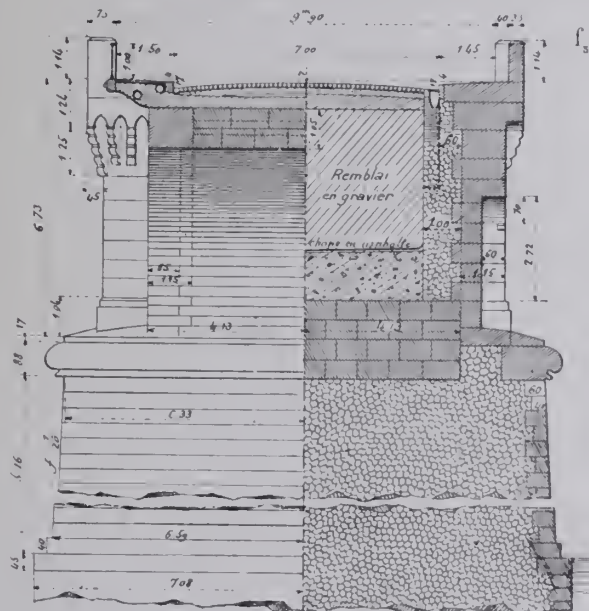
Bees — 4mm
Coupe horizontale sous le cordon

f_6 Pile 1

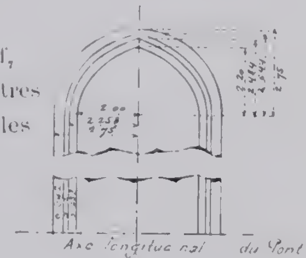


Coupes en travers — 5mm
à la clef d'une voûte — sur l'axe d'une pile

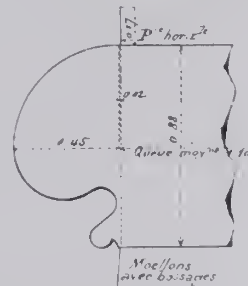
f_5



f_7 Autres piles



f_8 — Cordon des piles — 3cm

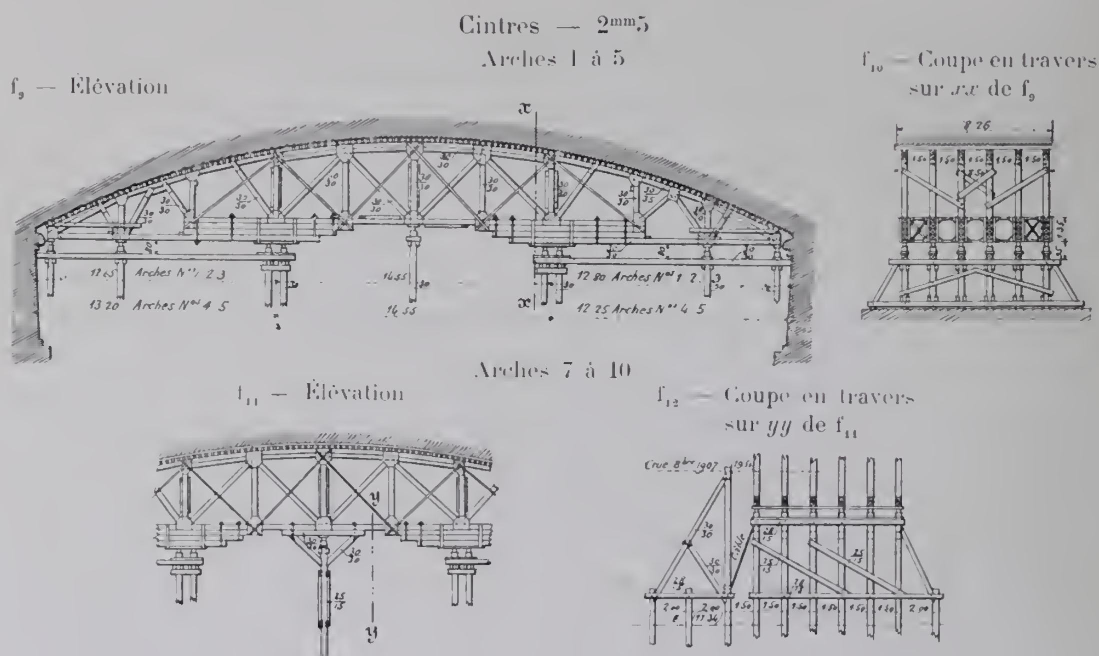


4. Cintres. — Les cintres des 5 arches à partir de la rive gauche ont été réemployés aux 5 autres.

Les palées simples sont enfoncées de 4^{m} environ dans le gravier, au refus de $0^{m}01$ par 10 coups d'un mouton de 800^{k}, tombant de 3^{m}.

Les palées doubles reposent sur les fondations en béton de l'ancien pont en charpente.

Les cintres ont été montés par 18 charpentiers.



Cintres — $2^{mm}5$

Arches 1 à 5

f_9 — Élévation

f_{10} — Coupe en travers sur xx de f_9

Arches 7 à 10

f_{11} — Élévation

f_{12} — Coupe en travers sur yy de f_{11}

5. Fondations à l'air comprimé (janvier 1905 - mars 1907). — A la pile 4, le rocher était en pente : le caisson s'est déversé de $0^{m}16$ environ et, sur une petite partie du pourtour, le couteau ne l'a pas atteint. On a fermé avec des sacs de ciment l'intervalle entre le rocher et le couteau.

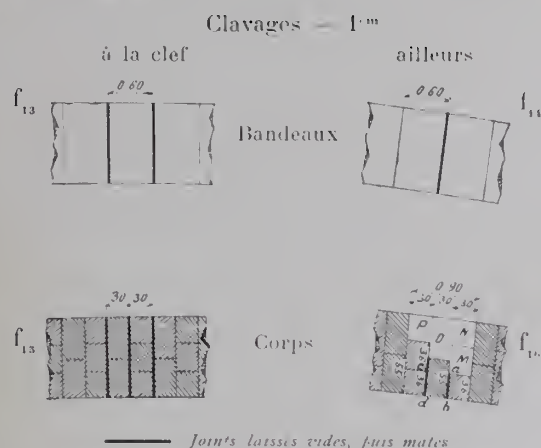
Les chambres de travail ont été remplies de béton de chaux à 2 volumes de mortier à 400^{k} pour 3 de galets.

Les massifs de fondation sont en moellons ordinaires à chaux ; leurs parements, en moellons de choix équarris ; leurs couronnements, en libages.

6. Exécution des voûtes. — Elles ont été construites voûte par voûte, de la rive gauche à la rive droite.

On maçonnait sur toute l'épaisseur ; on ménageait en 9 points (clef, naissances et 3 points intermédiaires de chaque côté, au-dessus des points fixes du cintre), des joints secs, matés ensuite simultanément, au mortier à l'état de sable humide (S_2).

Le mortier de matage était, comme pour le reste de la voûte, à 600^{k} de ciment maritime Pavin de Lafarge. La quantité d'eau variait suivant que le sable était plus ou moins sec ; elle était en moyenne de 180 litres (S).



On matait d'abord les bandeaux (f_{13}, f_{14}).

Dans le corps, on matait les joints *ab*, *cd* (f_{16}) ; puis on posait les voussoirs M, N, O, P, dont on matait les joints.

Les joints de matage avaient 8mm aux têtes, 12 à 15mm dans le corps de la voûte.

Quelques poteaux de la passerelle de service traversaient l'emplacement de la voûte pour s'appuyer sur les cintres. On remplissait les vides laissés par eux dans la voûte, et on en matait les joints.

Aux premières voûtes, la courbe d'intrados s'est un peu déformée, parce que les tirants du cintre n'étaient pas bien réglés, et peut-être aussi parce qu'on avait employé quelques bois du vieux pont.

On a occupé à la construction des voûtes 30 maçons et 20 manœuvres.

4 ouvriers faisaient un clavage en 2 à 3 jours.

7. Tassement des cintres.

Voûte n°		*Surhaussement de la clef en mm*	Tassement de la clef en *mm* sous la charge : des 2/5 de la voûte (*Bandeaux posés*)		de la moitié de la voûte		des 2/3 de la voûte	des 4/5 de la voûte (*Bandeaux posés*)	de toute la voûte			
			Tassement observé à la clef	Tassement propre de la tête des pieux	Tassement observé à la clef	Tassement propre de la tête des pieux			non clavée	clavée: Tassement observé à la clef	Tassement propre de la tête des pieux	Nombre de jours entre le clavage et l'observation
1 (R G)	amont aval	35mm 17	*Centre chargé du pont de service.*				19 3		58 61			
2	amont aval	31 31	34 29	12 11						57 47		*9 j*
3	amont aval	45 48					32 51	*Bandeaux posés*		54 73	6 12	*2 j*
4	amont aval	65 67						60 68		70 100		*12 j*
5	amont aval	57 50			26 28					57 72		*22 j*
6	amont aval	38 43					48 36			52 60		*10 j*
7	amont aval	55 43			42 34					64 38		*8 j*
8	amont aval	43 41			54 21 *Bandeaux posés*	17 18				57 59		*2 j*
9	amont aval	63 59			45 52					84 66		*3 j*
10 (R D)	amont aval	29 29			1 10					38 36		*7 j*

8. Dates d'exécution des voûtes. — Mouvements, en *mm*. observés à chaque décintrement.

▼ Abaissements, ▲ Relèvements des clefs des voûtes [3]. — ⇄ Mouvements horizontaux des piles.

Voûte n°	Dates de construction: Commencement	Dates de construction: Clavage	Date du décintrement (*Nombre de jours après clavage*)		Voûte n° 1 (RG)	Pile n° 1	Voûte 2	Pile 2	Voûte 3	Pile 3	Voûte 4	Pile 4	Voûte 5	Pile 5	Voûte 6	Pile 6	Voûte 7	Pile 7	Voûte 8	Pile 8	Voûte 9	Pile 9	Voûte 10 (RD)
1	1907	1907	1908 20-II	amont	10	→ 1,5	▲ 1,1		clavée		clavée		cintre terminé										
R G	11-IX	14-X	*129 j*	aval	▼ 8	→ 2	0,9																
2	2-XI	29-XI	20-III	amont	▲ 1,8	← 0,8	7.5	→ 0,8	▲ 0,8		clavée		non clavée		cintre terminé								
			113 j	aval	1,8	← 1	▼ 8	→ 1	0,7														
3	10-XII	1908 7-I	16-IV	amont			▲ 1,5	← 0,4	6.1	→ 0,6	▲ 0,5		clavée		construite à moitié		cintre monté						
			100 j	aval			1,5	← 0,9	▼ 6,4	→ 0,7	0,3												
4	1908 21-I	15-II	15-V	amont					▲ 0,2	← 0,8	6 6	→ 0,6	▲ 0,7		clavée		construite au 1/4		3 fermes montées				
			90 j	aval					1,2	← 0,6	▼ 6	→ 0,5	0,5										
5	29-II	24-III	23-VI	amont							▲ 1,7	← 0,2	7.8	→ 0,9	▲ 0,9		clavée		construite aux 4/5		cintre terminé		
			91 j	aval							2	← 0,8	▼ 8.3	→ 0,8	0,8								
6	2-IV	28-IV	23-VII	amont									▲ 1,5	← 0,5	6	→ 0,1	▲ 0,8		clavée		construite à moitié		2 fermes montées
			86 j	aval									1,5	← 0,5	▼ 6	→ 0,3	0,7						
7	9-V	3-VI	26-VIII	amont									▲ 0,7	0	▲ 3,2	0	14.5	0	▲ 1		clavée		construite aux 4/5
			84 j	aval									0,2	0	2,5	← 1,5	▼ 15.2	0	0,3				
8	10-VI	2-VII	8-IX	amont													▲ 3,8	← 2	13.5	→ 0,2	▲ 2,1		clavée
			68 j	aval													4,3	← 2,7	▼ 16	→ 0,3	1,9		
9	10-VII	3-VIII	29-IX	amont															▲ 4,5	← 1,3	14	→ 0,5	▲ 1,2
			57 j	aval															5,0	← 1,3	▼ 19,7	→ 0,1	1
10	12-VIII	3-IX	18-XI	amont																	▲ 4,8	← 1	16.2
R D			*76 j*	aval																	4,4	← 3	▼ 19

3. — On n'a pas mesuré les abaissements des appuis ; on n'a donc pas le tassement propre des voûtes.

9. Dépenses.

	Fondations	Élévation	Ensemble
Entreprise	649.660f78	958.423f14	1.608.083f92
Régie	14.000f	61.000f	75.000f
	663.660f78	1.019.423f14	1.683.083f92

10. Personnel.

Ingénieurs :

Projet. — en chef : M. Dyrion ; — ordinaire, M. Armand ;

Exécution. — en chef : M. Gubiand ; ordinaires, M. Armand, puis M. Hugues.

Entrepreneur : M. Joseph Fayolle, de Grenoble.

SOURCES :

S_1. — Dessins et renseignements gracieusement communiqués par MM. Armand et Hugues.

S_2. — Renseignements qu'a bien voulu me donner M. Gubiand.

S_3. — Ce que j'ai vu — janvier 1913.

Ce qui n'est pas spécifié S_2 est de S_1.

PONT SUR LA MOSELLE, A TRITTENHEIM *(ALLEMAGNE, – Prusse-Rhénane)*

Route de Trittenheim à Trèves [1]

1907–1908 — $\bar{A}^n$ r[te] (> 40m) 9

Φ_1 — amont (S_2)



1. Matériaux (S'_1, S_2). — Tout est en béton, sauf l'arête des avant-becs qui est en granit.

Au-dessus des naissances, les parements vus, sauf les douelles des grandes voûtes, sont colorés en rouge, peut-être pour imiter le grès rouge.

2. Quelques observations. — On a abattu par un chanfrein l'arête d'extrados (S_2).

On a armé les voûtes d'évidement (S''_1).

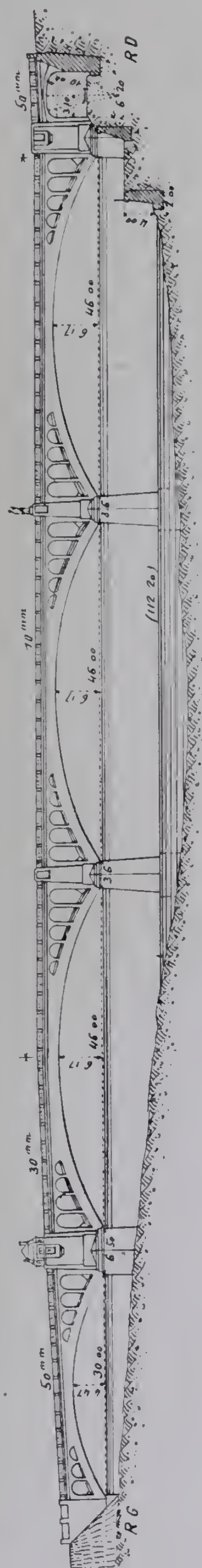
Au-dessus des piles, la chaussée et les trottoirs sont portés par une dalle en béton armé appuyée sur les pilastres (S''_1).

Un fer apparent protège les bordures en béton des trottoirs (S_2).

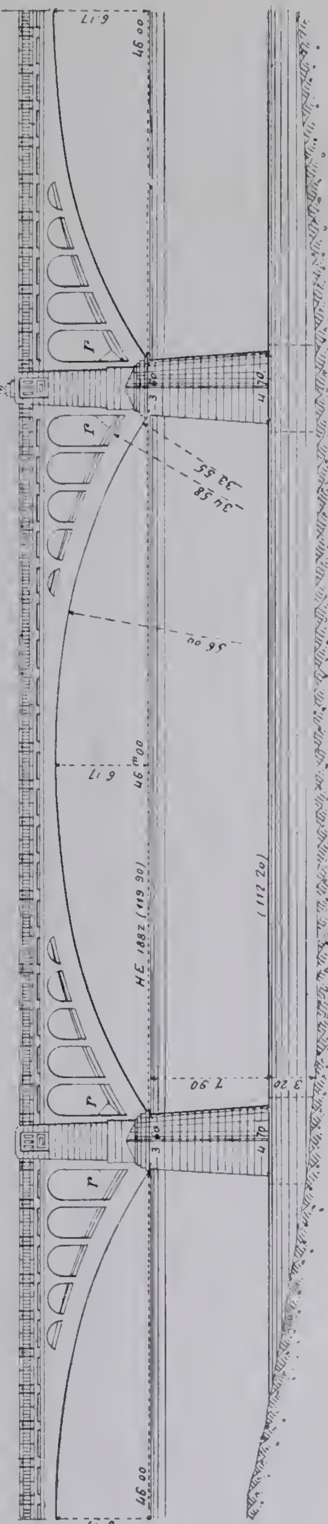
Le pilastre amont de la pile rive droite porte une statue de Jean Trithemius [2].

1. — entre le village et la station du chemin de fer d'intérêt local de Trèves à Bullay (Moselbahn), à 31k7 de Trèves. Le pont est à 150m en amont de la station.

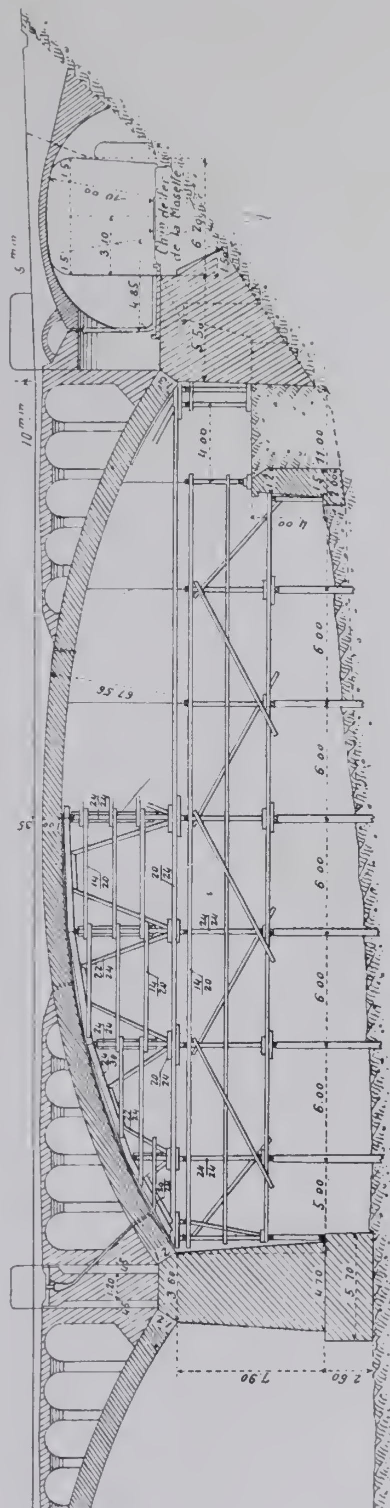
2. — Historien et théologien, né à Trittenheim en 1462, mort à Wurtzbourg en 1516.



f_1 — Ensemble, amont — 1^{mm}



f_2 — Une grande voûte — 2^{mm}



f_3 — Coupe en long et cintre de l'arche rive droite — $2^{mm}5$

Elle est à bonne échelle pour les gens qui passent sur le pont, trop petite pour ceux qui le regardent.

Sur le pilastre aval de la pile rive gauche, est une niche pour le préposé au péage.

3. Aspect (S_2). — On voit trop les changements de courbure de l'extrados.

Les dièdres de béton (*r* de f_2) sont d'aspect assez fâcheux.

Les piles des voûtes d'élégissement paraissent maigres.

On n'a pas fait disparaître : aux têtes, les limites des tranches de bétonnage et les empreintes des planches ; en douelle, l'empreinte du platelage.

4. Dates (S''_1).

Commencement des travaux	commencement de juillet 1907
Piles et culées	23 juillet - octobre 1907
Grandes voûtes	4 - 21 août 1908
Ouverture à la circulation	1er janvier 1909

5. Personnel (S''_1). — Celui du Pont de Schweich[3].

3. — $\overline{A}^n$ 1te (≥ 40m)^7, - Tome III.

SOURCES :

Celles du Pont de Schweich. $\overline{A}^n$ 1te (≥ 40m)^7 - Tome III. p. 269.

PONT SUR LA MOSELLE, A LONGUICH[1] (*ALLEMAGNE, – Prusse-Rhénane*)

Route de Longuich à Mehring

1909–1911 $\bar{A}^n r^{te} (> 40^m)^{10}$

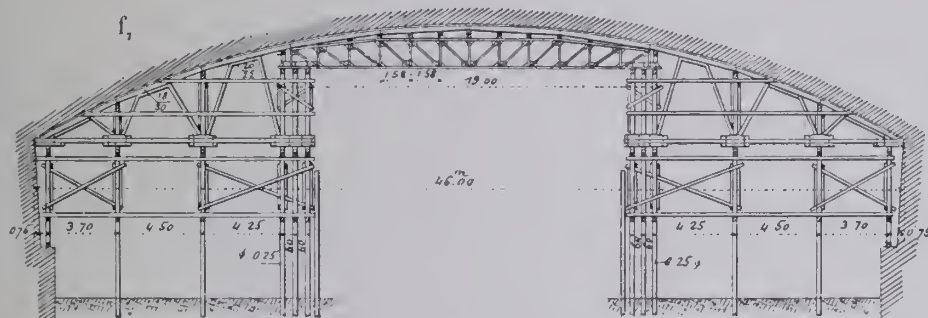
Φ_1 – amont (S''_1)



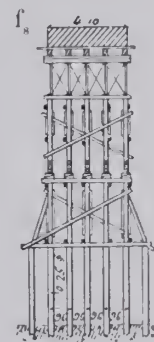
1. Cintres.

Cintre de l'arche de 46^m – 2^mm5

f_7

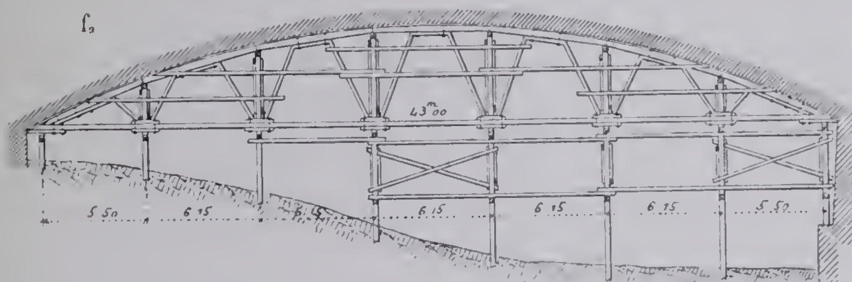


f_8

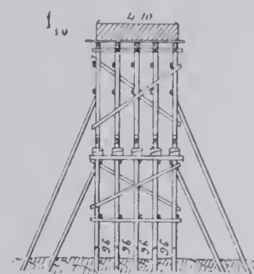


Cintre des arches de 43^m – 2^mm5

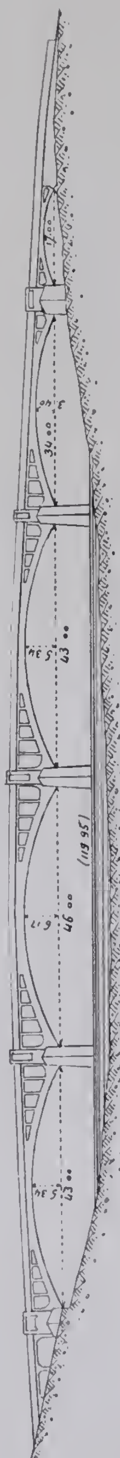
f_9



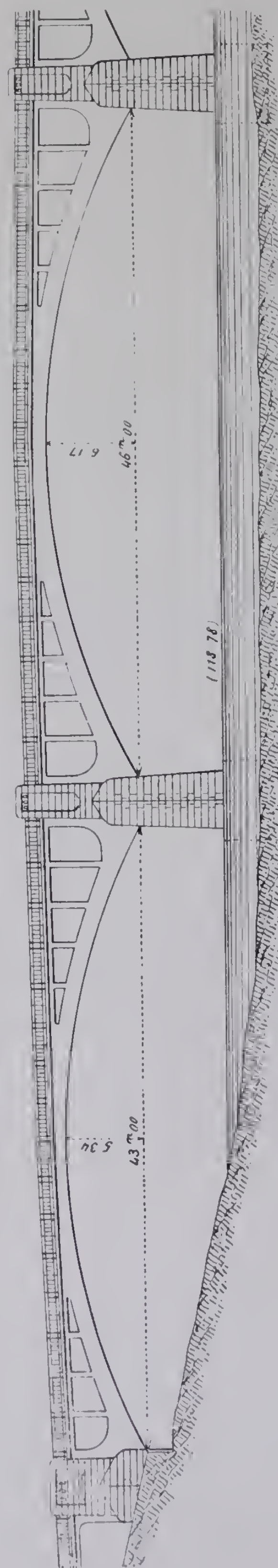
f_{10}



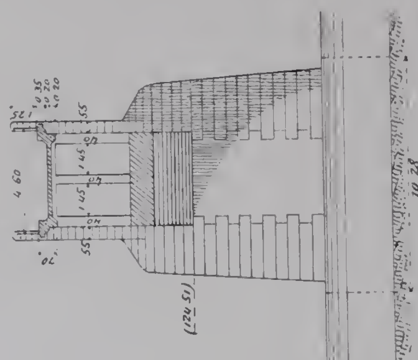
1. Station du chemin de fer d'intérêt local de Trèves à Bullay (Moseltalbahn), à 12^km5 de Trèves.



f₁ — Ensemble aval — 0mm75

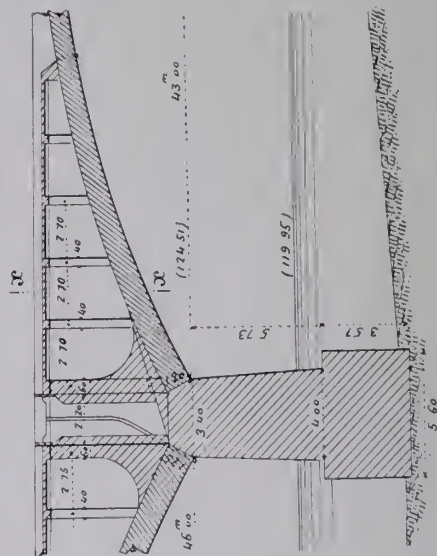


f₂ — Les deux grandes voûtes, côté rive droite — 2mm

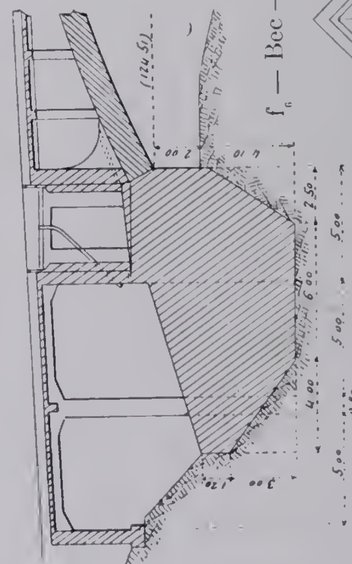


f₅ — Coupe en travers sur *xx* de f₄ — 3mm

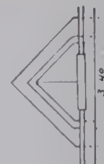
Coupes en long — 3mm



f₄ — Pile centrale



f₃ — Culée rive droite



f₆ — Bec — 3mm

2. Dates.

Commencement des travaux .... 2 mai 1910
Piles et culées .... commencement de juin - 15 octobre 1910
Grandes voûtes .... 20 juillet - 8 août 1911
Décintrement .... 15 septembre 1911
Ouverture à la circulation .... 1er janvier 1912

3. Personnel.

Projet : M. Herm. Möhle, Ingénieur;
Direction des Travaux : M. C. Möhle.
Entrepreneurs : MM. B. Liebold et Cie, d'Holzminden (Brunswick).

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution (S'_1), photographie (S''_1) et renseignements (S'''_1), qu'a bien voulu m'adresser M. Liebold, — mars 1912.

QUELQUES VOÛTES INARTICULÉES

QU'ON AURAIT, A TORT, CHERCHÉES

DANS LES SÉRIES DU LIVRE I

Après les voûtes inarticulées de 40^m et plus de portée, j'en vais décrire sommairement quelques autres qu'on aurait pu chercher dans les séries du Livre I.

Ce sont :

1° des voûtes de 40^m ou plus, en béton assez peu armé pour qu'on les ait calculées sans tenir compte du métal. — On les trouve dans des statistiques de voûtes non armées ;

2° des voûtes de 40^m ou plus, tombées pendant qu'on les construisait ;

3° des voûtes auxquelles on a attribué à tort 40^m ou plus, — voûtes qui existent, — voûtes ruinées, — voûtes qui n'ont jamais existé.

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	PROJET ENSEMBLE *Longueur de l'ouvrage* Déclivité Hauteur maxima de l'ouvrage au-dessus du sol ou de l'étiage	 Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la voie portée sur l'extrados	 GRANDES VOÛTES INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons de courbure : à la clef aux naissances*	 ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Retombées*	 COMMENT SONT ARMÉES LES VOÛTES	 MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	 PRESSIONS en kg $\overline{0^m01}^2$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	 1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
sur la **Delaware** *États-Unis* 1909-1910 *7 voûtes biaises en ellipse : 5 de 45m72 2 de rive de 36m58 sous chemin de fer à voie normale.*	*442m56* 5mm5 21m64	8m534 *10m363* Pas de fruit 2m50 environ	Ellipses **45m, 72** *12m192* $\frac{1}{3,75}$ = 0,266 *12m86* *6m50*	1m, 829 *4m40 environ* *au milieu de la montée*	A l'intrados et à l'extrados, grillage de barres carrées Épaisr mm / Écartt cm en long : 32 / 53 en travers : 25 / 91	B [1] 1v, 3v, 5v		1° Murs transversaux de 0m91, espacés de 3m962, portant une plate-forme. Aux têtes seulement, voûtes. Le tout en béton armé 2° *Archivoltes*
de la **Monroe Street** à **Spokane** *États-Unis* 1909-1911 *Pont en 2 anneaux, à une grande arche de 85m65 en arc peu surbaissé, entre 2 de 36m58 en plein cintre, sous route.*	*181m env.* 16mm 39m36 (étiage)	20m72 *Anneaux, en douelle à la clef 1m877* Vide entre eux 6m096 1m829	Arc de cercle peu surbaissé **85m, 65** *34m67* $\frac{1}{2,470}$ = 0,404 *43m78*	2m, 058 *5m, 638*	Barres carrées de 25mm4 à l'intrados et à l'extrados	B [1] Corps 1v, 2v5, 5v Clefs 1v, 2v, 4v Culées 1v, 3v, 6v	Pressions avec surcharge : Clef : max. 36k4, min. 4k9 Retomb : max. 20k7, min. 10k5 *Arc élastique* Surcharge 10 % de la charge totale Chaussée : 2 voitures de tramway de 50T Rouleau de 15T Trottoirs : 488k/1m²	1° Sur chaque tête 2 murs de 0m6 percés de 10 voûtes transversales en plein cintre de 5m16 sur piles de 1m07 reliées par des murs transversaux Le tout en béton armé 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0m01² *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDES VOÛTES — CINTRES — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois, Poids de fer, Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité de surface utile S_p [3] de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Culée Ouest *Gravier* Autres fondations *Rocher solide* — 7m86 environ *Grand empatement*	Arcs d'acier à 3 articulations retroussés sur toute la portée Près de la clef, barres de longueur variable permettant d'abaisser le cerveau (voir la monographie)	10 » »	2 cintres pour les 5 voûtes de 45m72.		A pleine épaisseur, à partir des retombées. Aux voûtes de 45m72, on a laissé la clef ouverte pendant 7 jours. Aux voûtes de 36m58, 3 clavages : au 1/3 de la 1/2 portée à partir de la clef, puis à la clef. Les parois des clavages avaient 6 redans normaux aux têtes.	Voûtes nues *30 jours* »		Cube de Béton 39372mc *(Prévisions)*
Basalte Pressions MAX. : 8k4 min. : 4k9	Retroussé sur 58m52 (Poutre droite en acier) Coins en fonte sous les couchis	4 *30cm* 1m177 à la clef	Le même cintre a servi pour les 2 anneaux.		A pleine épaisseur, en 12 tronçons, 9 clavages. On posa d'abord les 2 tronçons de clef, puis les autres symétriquement à partir des naissances.	*1er anneau* » » 8 juin *2e anneau* » » 10 août	*1er anneau* t_c 38mm t'_v = 0 *2e anneau* t_c = 38mm t'_v = 0	Q = 19112mc Q : S_p = 5mc09 Q : W = 0mc18 D = 2590000f D : S_p = 690f7 D : W = 25f0 D : Q = 135f5

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES INARTICULÉES ⩾ 40m

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	PROJET — ENSEMBLE *Longueur de l'ouvrage* Déclivité Hauteur maxima de l'ouvrage au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets / *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la voie portée sur l'extrados	GRANDES VOÛTES — INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons de courbure : à la clef, aux naissances*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Retombées*	COMMENT SONT ARMÉES LES VOÛTES	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg/0m01² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Boberullersdorf** *Prusse* 1908-1909 *Une seule grande arche sous route*	*70m 20* 0 12m60	6m 00 *5m 40* Pas de fruit 0m 30	Arc d'anse de panier à 3 centres assez surbaissé **58m,10** *8m 80 et 9m 60* *Moyenne 9m 20* $\frac{1}{6,315} = 0,158$ *47m* *21m*	**1m,00** *1m 30*	Fers ronds de 20mm au cerveau à l'intrados	B [1] Ciment......... 1v Sable........... 2v5 Gravier .... 5v (Granit)	Pressions avec surcharge : MAX. / moy. Clef 39k7 / 24k8 Retombées 33k6 / 23k 400k 1m² et Rouleau de 23T, ou 1190k 1m²	1° 18 voûtes transversales vues, en plein cintre, en béton armé, de 1m95, sur piles de 0m5, 0m7, 0m8 2° »
d' **Elsen** *Prusse* 1909-1910 *Une seule grande arche sous route*	*58m* 40mm 40mm 7m20	7m 00 *7m 00* Pas de fruit 0m30	Arc d'anse de panier à 3 centres très surbaissé **46m,00** *5m 10* $\frac{1}{9,019} = 0,111$ *62m 90* *38m 80*	**0m,80** *1m 10*	Fers ronds au cerveau à l'intrados	Bandeaux : MEV [1] Calcaire Corps : B [1] Ciment......... 1v Sable........... 2v Pierre cassée... 4v (Calcaire)	Pression max. : avec / sans influence de la température Clef 51k5 / 50k2 Joints de rupt. 42k2 / 41k3 Retombées 30k8 / 25k2 *Arc élastique* 1000k 1m²	1° Pas d'évidements 2° »
de **Cassel** *Prusse* 1909-1910 *Une seule grande arche sous route*	*79m 60* 32mm2 31mm7 8m	16m 00 *16m 60* Pas de fruit 0m48	Arc d'anse de panier à 3 centres très surbaissé **57m,30** *5m 23* $\frac{1}{10,994} = 0,091$ *90m* *75m 469*	**1m,10** *1m 30*	Fers ronds de 25mm et 15mm au cerveau à l'intrados, aux reins à l'extrados	Bandeaux Grès Corps : B [1] Ciment Vorwohler 1v Sable basaltique 1v / de la Fulda 1v 2v Basalte cassé..... 3v Résistance moyenne à 40 j. : 349k	Pressions avec surcharge : MAX. / moy. Clef » / 35k9 Joints de rupt. 45k / 28k3 Retombées » / 30k3 *Courbe de pression construite avec points de passage arbitrairement choisis.* 800k 1m²	1° Entre tympans pleins, 10 murs transversaux de 50cm espacés de 3m, portant une plate-forme de 20cm en béton armé 2° *Arcleroô'te de 20 de hauteur*

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. 11, n° 6.

EN BETON PEU ARMÉ

TABLEAU SYNOPTIQUE (*Suite*)

EXÉCUTION								CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D
	GRANDES VOÛTES							
FONDATIONS	CINTRES				MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT	TASSEMENTS DE LA CLEF	Totaux et par unité de surface utile S_p [3] par unité de volume « utile » W [4]
	FERMES		Cube de bois Poids de fer Dépenses					
Nature du sol Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0^m01^2 *Procedé*	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Totaux	par mq de douelle [2]		État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Rocher (Gneiss dur) » Pression : 4^k8	Fixe Montants et contrefiches Coins entre billots de bois dur	6 *20^cm* 1^m04 *150^mm*	180^{mc} » »	$0^{mc}55$ » »	A pleine épaisseur Tranches de 1^m50 environ alternées	» *1 mois 1/2 environ* Milieu d'août	t'_v = 100^{mm} t''_v = 50^{mm}	Q = $1\,371^{mc}$ Q : S_p = $3^{mc}25$ Q : W = $0^{mc}32$ Fondations / Élévation / Ensemble D : 11396^f / 62644^f / 74040^f D : S_p : 27^f1 / 148^f7 / 175^f8 D : W : 2^f7 / 14^f8 / 17^f5 D : Q : » / » / 54^f0
Gravier » Pression maxima : 3^k *10 coupons de vieux rails de 3^m30 entretoisés en haut par des fers ronds*	Fixe Montants et contrefiches Coins	7 *20^cm* 0^m88 *120^mm*			A pleine épaisseur Tranches isolées	Tympans construits *1 mois 1/2 environ* Octobre	t_c = 20^{mm} t'_v = 110^{mm} t''_v = 0	Q = $1\,437^{mc}$ Q : S_p = $3^{mc}54$ Q : W = $0^{mc}31$ Fondations / Élévation / Ensemble D : 24951^f / 41290^f / 66241^f D : S_p : 61^f5 / 101^f7 / 163^f2 D : W : 5^f4 / 9^f0 / 14^f4 D : Q : » / » / 46^f1
Marne rouge solide » Pression : 4^k *A sec*	Fixe Passe navigable de 6^m Montants et contrefiches Coins	17 *20^cm* 1^m025 *150^mm*	» 13574^f »	» 14^f0 »	A pleine épaisseur Tranches isolées	Tympans construits *1 mois 1/2 environ* Août	t_c = 100^{mm} t'_v = 40^{mm}	Q = $7\,383^{mc}$ Q : S_p = $4^{mc}75$ Q : W = $0^{mc}80$ Fondations / Élévation / Ensemble D : 11487^f / 294210^f / 305697^f D : S_p : 9^f0 / 231^f0 / 240^f0 D : W : 1^f2 / 31^f7 / 32^f9 D : Q : » / » / 41^f4

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES INARTICULÉES ⩾ 40m EN BÉTON PEU ARMÉ

MONOGRAPHIES

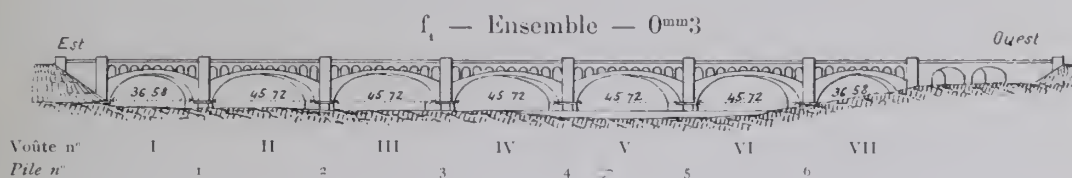
1. — PONT SUR LA DELAWARE, PRÈS DE PORTLAND

(ÉTATS-UNIS, - Pennsylvanie)

Raccourci Slateford-Hopatcong (Delaware, Lackawanna and Western R. R.)

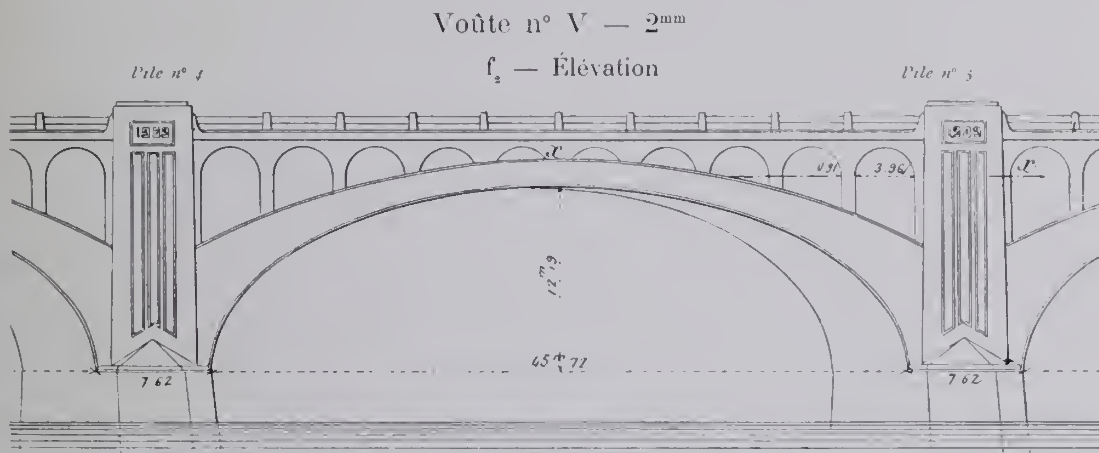
1909-1910

f_1 — Ensemble — 0mm3



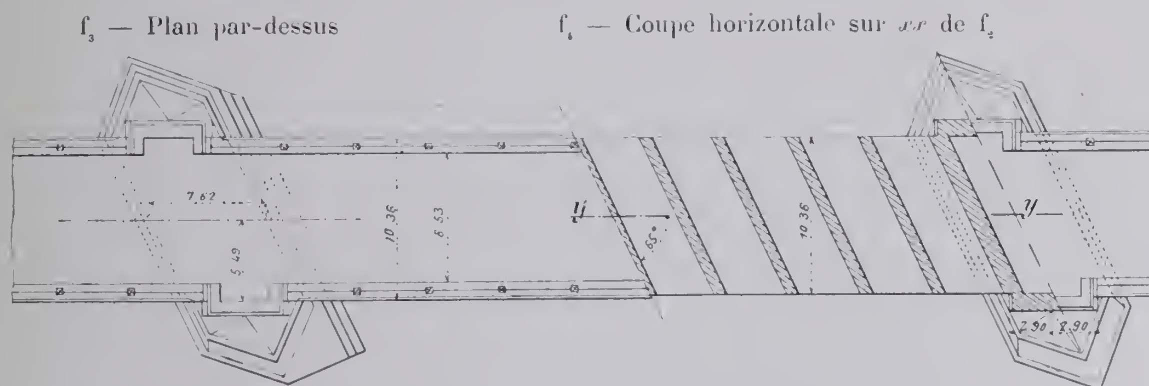
Voûte n° V — 2mm

f_2 — Élévation



f_3 — Plan par-dessus

f_4 — Coupe horizontale sur xx de f_2

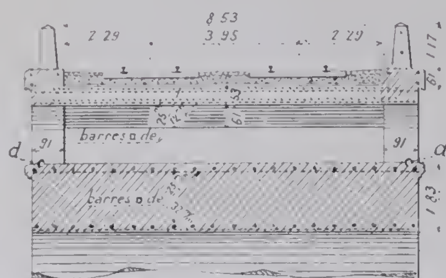


1. Pile-culée n° 4 (f_1). — A la fin de la campagne de 1909, il restait à faire les voûtes V et VI. A cause des glaces, on ne pouvait laisser, pendant l'hiver, la voûte IV sur cintre. On élargit et on renforça la pile 4 (f_1, f_2, f_3).

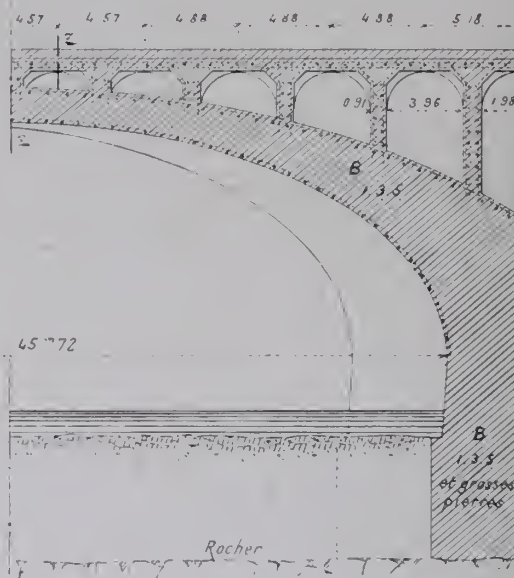
2. Écoulement des eaux. — Celles arrêtées par la plate-forme sous le ballast sont conduites aux piles, et de là dans le sol.

Celles qui ont traversé la plate-forme, celles qui sont jetées par le vent sur l'extrados, s'écoulent par des sillons *d* (f_6) creusés dans l'extrados, parallèlement aux têtes.

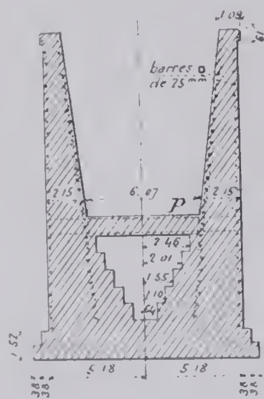
f_6 — Coupe en travers sur *zz* de f_5 — 5mm



f_5 — Demi-coupe en long sur *yy* de f_4 — 2mm5



f_7 — Culée Est
Coupe en travers
2mm5



3. Parements. — Les arêtes des piles en rivière sont en granit.

Aux têtes des voûtes, les planches des cloisons avaient été placées suivant le rayon.

4. Appui des voûtes biaises sur les piles. Les retombées présentaient 6 redans normaux aux têtes.

A la retombée Ouest de la voûte VII (f_1), chacun de ces redans était découpé en gradins horizontaux.

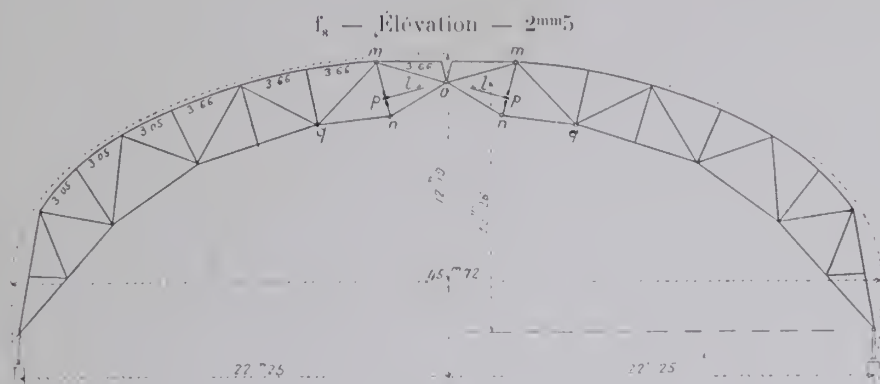
5. Culée Est. — Ses murs sont reliés par des poutres P (f_7) en béton armé.

6. Cintres. — *A. - Voûtes de rive.* — On a bâti l'arche VII sur le cintre, en bois, de l'arche I (f_1), transporté.

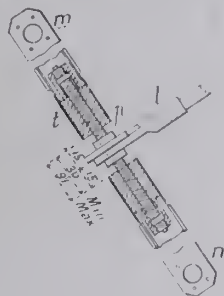
B. - Voûtes de 45^m72. — B_1. *Nombre de cintres.* — Ceux des voûtes II et III ont servi aux 3 autres.

Cintre des voûtes de 45^m72

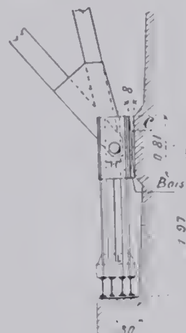
f_8 — Élévation — $2^{mm}5$



f_{10} — Appareil de manœuvre (*m n* de f_8) — 2^{cm}



f_9 — Appuis — 1^{cm}



B_2. *Fermes* (f_8). — Chaque ferme est un arc d'acier à 3 articulations, appuyé aux naissances : verticalement, sur le socle de la pile (f_9) ; horizontalement, sur un corbeau *c* en béton (f_9), rasé après décintrement.

B_3. *Dispositif pour mettre les fermes à hauteur et pour décintrer* (f_8, f_{10}). — Les deux quadrilatères *mqno* (f_8) sont articulés. Leurs diagonales *mn* sont formées de deux pièces *mp*, *np* dont les abouts s'engagent dans une tige filetée *t* (f_{10}) à pas de vis contraires. En manœuvrant un levier *l* on fait varier les longueurs *mn* par suite *qo* (f_8) : on peut ainsi abaisser ou relever le cerveau du cintre.

Pour décintrer, on enlève les pièces reliant les fermes, puis on manœuvre les leviers *l*.

B_4. *Travail permis.* — Sous les charges : à la compression, $11^{k}9/\overline{0^{m}001^{2}}$; à la tension, $11^{k}2$.

Sous les variations de température : la limite même d'élasticité.

Le cintre est une construction provisoire et l'écart maximum de température admis au calcul, 78°, ne pouvait pas se produire.

B_5. *Tassements.* — Pour un béton pesant 2430^{k}, on avait calculé que le cintre tasserait :

sous le poids propre du cintre	de $2^{mm}4$
sous le poids de la voûte	de $34^{mm}1$
pour un abaissement de température de 78° Centigr	de $13^{mm}5$

Les tassements mesurés ont été sensiblement ceux-là.

7. Personnel.

A. - *Ouvrage.*

Projet : Ingénieurs en chef : M. Lincoln Bush, M. Am. Soc. C. E.,
puis M. G. J. Ray ;
Ingénieur : M. B. H. Davis, Assoc. M. Am. Soc. C. E.

Direction des Travaux : M. F. L. Wheaton, Ingénieur.

Entrepreneurs : MM. Smith et McCormick, d'Easton, (Pennsylvanie).

B. - *Cintre.*

Projet, construction, montage et démontage [1].

McClintic Marshall Construction C°, à Pittsburg.
Ingénieurs en chef : M. Paul L. Wolfel, M. Am. Soc. C. E.
Ingénieur : M. David S. Gendell, Jr.

1. — Démontage sous la direction des Entrepreneurs du Pont.

SOURCES :

S_1. — Engineering News, 30 décembre 1909, p. 713 à 716 : « *The Delaware River* « *concrete Bridge, Slateford-Hopatcong Cut-off ; Delaware, Lackawanna and Western R. R.* »
Les dessins sont de S_1.

S_2. — Railway Age Gazette, 3 janvier 1913, p. 9 à 14 : « *The Hopatcong-Slateford Cut-* « *off* » by C. W. Simpson, Resident Engineer, Delaware, Lackawanna and Western ; p. 12 à 14 : « *Delaware River Bridge* ».

S_1 signale, p. 713, un autre grand pont en béton de la même ligne, sur le Paulins Kill, près de Hainesburg (New-Jersey).

S_2 le décrit, p. 11 et 12. Il a 5 voûtes en plein cintre de $36^{m}58$, en béton peu armé.

2. — PONT DE LA MONROE STREET, SUR LE SPOKANE A SPOKANE *(ÉTATS-UNIS, - Washington)*

1909-1911

Φ_1 — aval (S'''_s)



1. Deux ponts jumeaux. — Deux ponts jumeaux, écartés de 6m096, portent une plate-forme en béton armé qui les déborde de 2m90. Sur deux anneaux, larges ensemble de 9m754, on a 20m72 entre parapets.

C'est une réplique des Ponts de la Rocky River [1] et de Walnut Lane [2], comme ceux-ci du pont de Luxembourg [3, 4].

2. Cintre. — Un premier cintre, retroussé, contreventé par des haubans, fut renversé le 21 juin 1910 par un vent de 19m à la seconde.

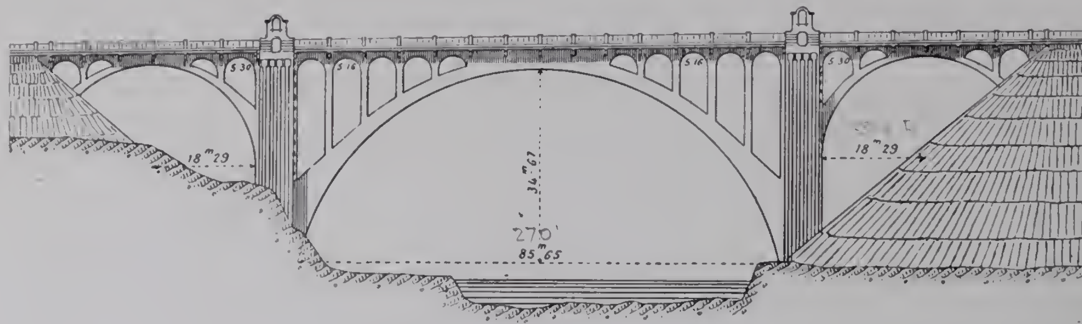
Le cintre a été ripé du premier anneau sous l'emplacement du second.

1. — $\hat{A}^1 \hat{A}^1$ rte ($\geqslant$ 40m)^3 2. — $\hat{A}^1 \hat{A}^1$ rte ($\geqslant$ 40m)^2 3. — $\hat{A}^1 \hat{A}^1$ rte ($\geqslant$ 40m)^1 — Tome II.

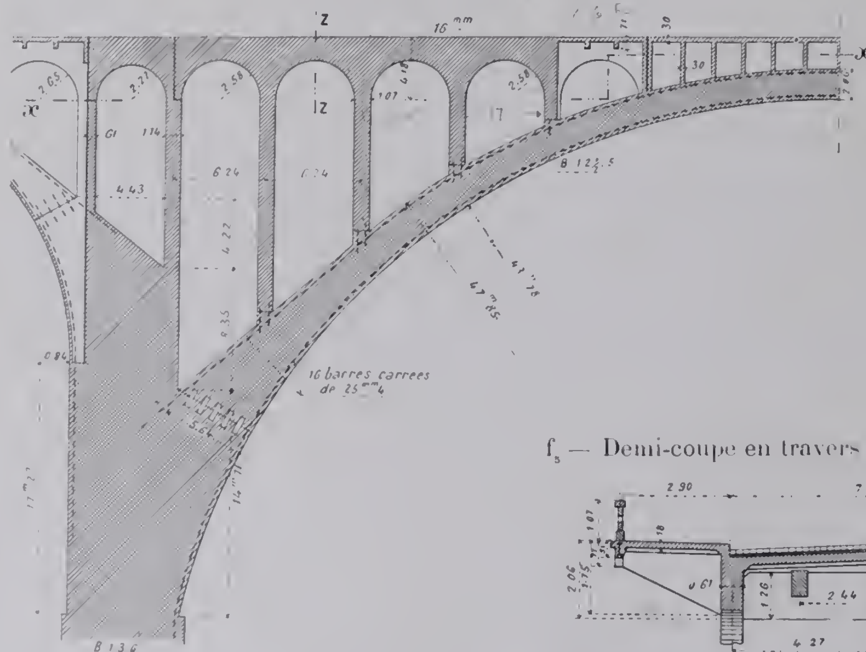
4. — On a récemment exécuté à Pittsburg 2 grands ponts de même aspect :
l'un en trois anneaux, Pont de la Meadow Street, terminé en 1910 (Portée : 63m70) *(Engineering News, 1er décembre 1910)* ;
l'autre en deux anneaux, Pont de la Lariner Avenue, terminé en août 1912 (Portée : 91m57) *(Engineering News, 19 décembre 1912)*.

Mais ces deux ponts sont tout entiers en béton armé.

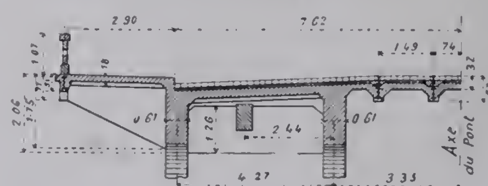
f_1 — Ensemble 0mm75



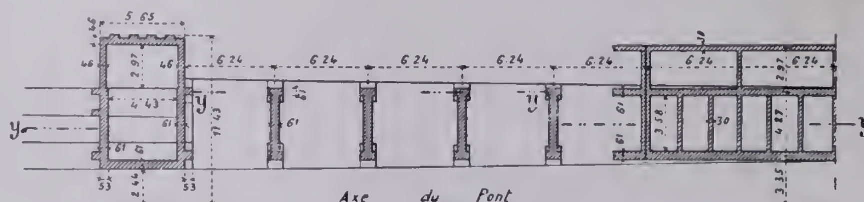
f_2 — Coupe en long sur yy de f_4 — 2mm

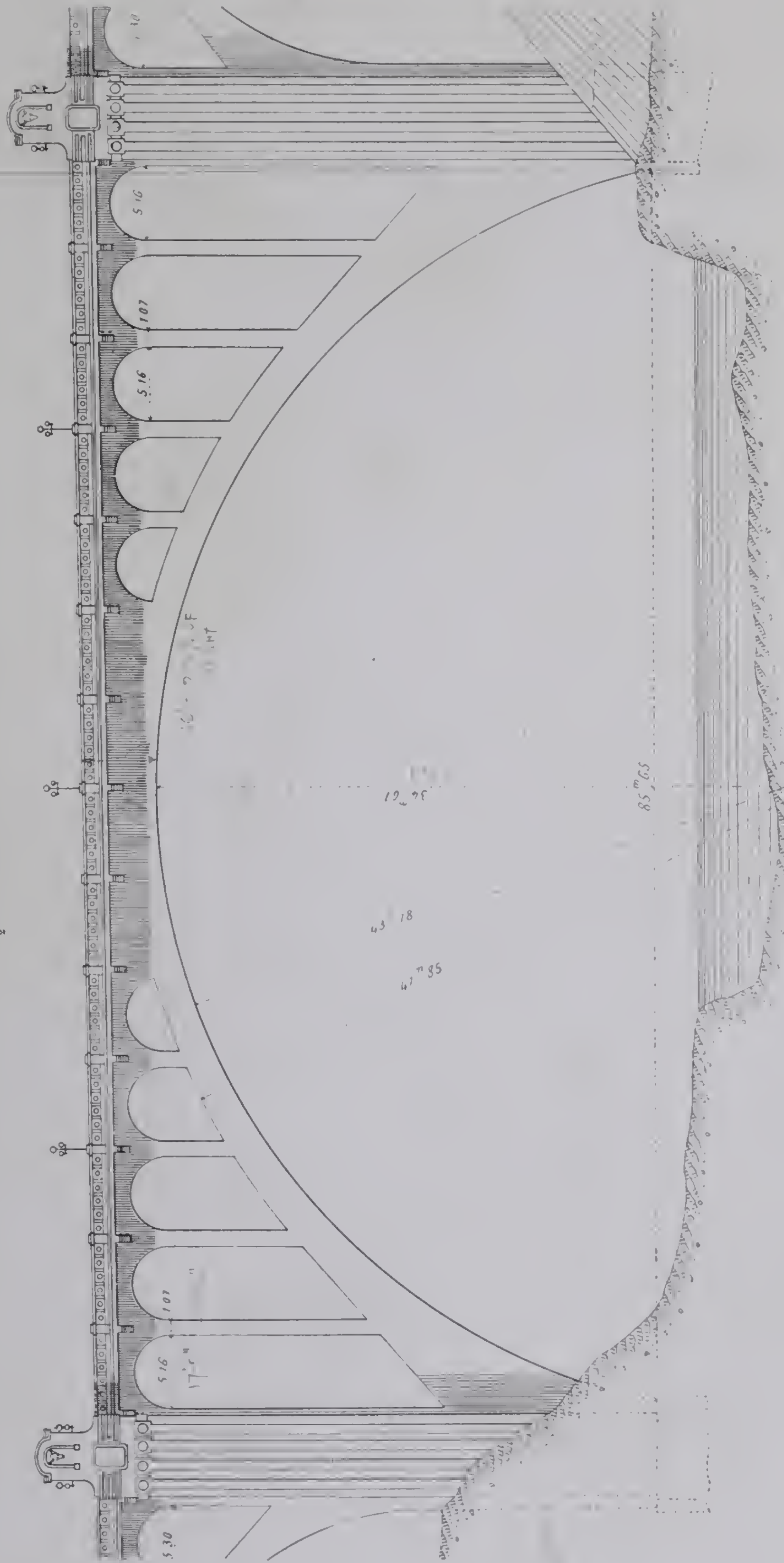


f_3 — Demi-coupe en travers sur zz de f_2 — 5mm



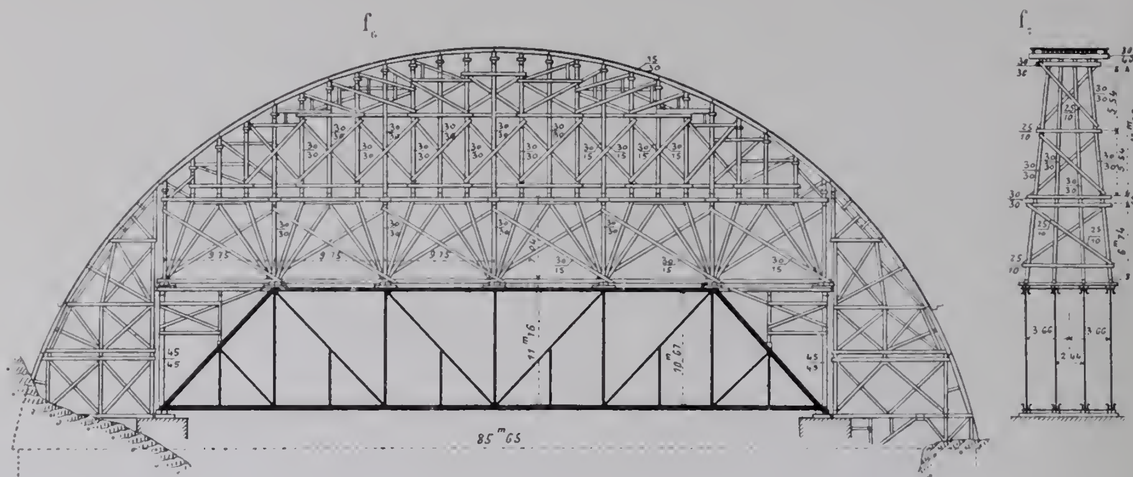
f_4 — Coupe horizontale sur xx de f_2 — 2mm





f_2 — Grande arche 2^{mm}

Cintre — 1mm5



3. Dates.

Commencement des travaux	septembre 1909	
Achèvement des fondations	avril 1910	
	1er anneau	2e anneau
Grandes voûtes	5-11 mai 1911	5-13 juillet 1911
Décintrement	8 juin	10 août
Ouverture à la circulation	23 novembre 1911	

On a attendu 6 mois les poutres d'acier du cintre : l'exécution a duré 1 an 5 mois.

4. Personnel.

Projet : M. John C. Ralston, M. Am. Soc. C. E, « City Engineer ».

Architecture : MM. Cutter et Mulmgreen, Architectes.

Exécution (en régie) : M. John C. Ralston ; puis, à partir d'avril 1910, M. Morton Macartney, M. Am. Soc. C. E, « City Engineer »,

MM. J. F. Greene, P. F. Kennedy et Roy Maloney « Assistant Engineers ».

On a armé les grandes voûtes sur les conseils du Professeur Wm. Burr, de New-York (S''_2).

SOURCES :

S_1. — Renseignements et photographies qu'a bien voulu me donner M. J. C. Ralston, mai 1911.

S_2. — Dessins d'exécution (S'_2), renseignements (S''_2) et photographies (S'''_2) gracieusement communiqués par M. Morton Macartney, - février 1912.

S_3. — Engineering News :

S'_3. — 2 septembre 1909, p. 241 à 243 : « *The Monroe St. Bridge, Spokane,* « *Washington : A concrete bridge containing a 281-ft Arch* ».

S''_3. — 4 mai 1911, p. 546, 547 : « *The Centering for the 281 ft Concrete Arch of* « *the Monroe St. Bridge, Spokane, Wash.* » by P. F. Kennedy.

3. — PONT SUR LA BOBER, A BOBERULLERSDORF

(PRUSSE, – Silesie, – Cercle de Hirschberg)

Route de Boberullersdorf à Boberröhrsdorf

1908–1909

$\Phi^1{}_1$ — (S'''_1)



1. Trottoirs. — Ils sont en encorbellement sur des consoles en béton armé (f_4).

2. Parements vus. — Après la construction d'un barrage en aval, le pont sera noyé jusqu'à 2m20 sous la clef. On s'est contenté de recouvrir les parements vus d'un enduit de ciment lissé (S''_1).

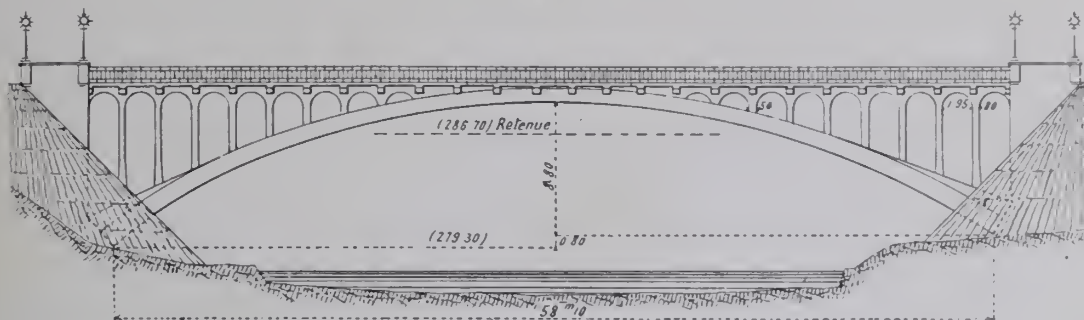
3. Joints de dilatation. — Il y en a 4 au-dessus de chaque demi-voûte.

4. Dates.

Commencement des travaux	8 avril 1908
Montage du cintre	15 mai – 15 juin
Grande voûte	20 juin – 4 juillet
Décintrement	Milieu d'août
Ouverture à la circulation	1909

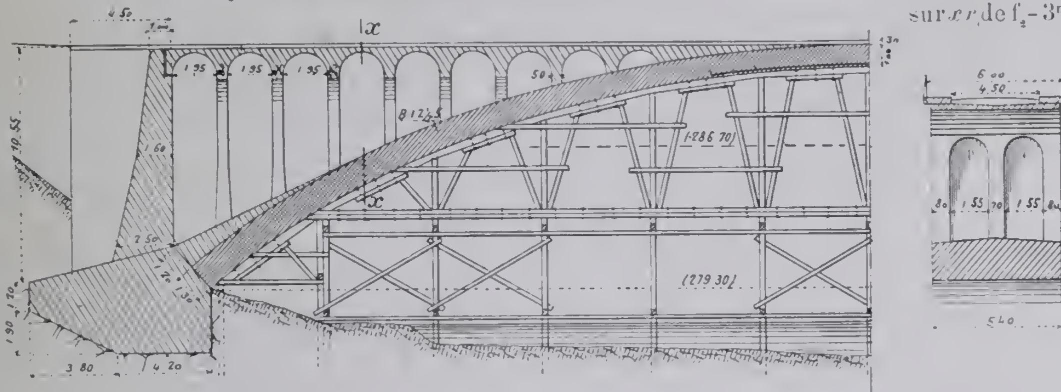
1. — Cliché *Germania*, Hirschberg, Silésie.

f_1 — Élevation — 2^{mm}



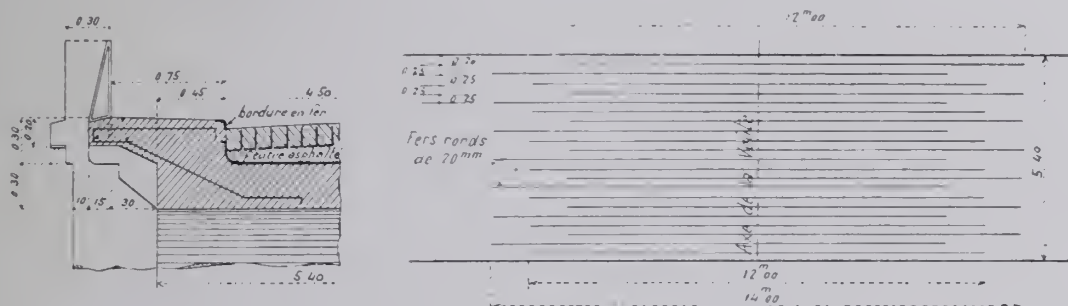
f_2 — Demi-coupe en long et cintre — 3^{mm}

f_3 — Coupe en travers sur xx de f_2 - 3^{mm}



f_4 — Couronnement — 2^{cm}

f_5 — Comment est armé le cerveau de la voûte
Plan — 5^{mm}



5. Personnel.

Projet et Entreprise : MM. B. Liebold et Cie, d'Holzminden.
Direction des Travaux : M. Riemenschneider, Ingénieur.

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution (S'_1), renseignements (S''_1) et photographie (S'''_1), gracieusement adressés par M. B. Liebold, en août 1909.

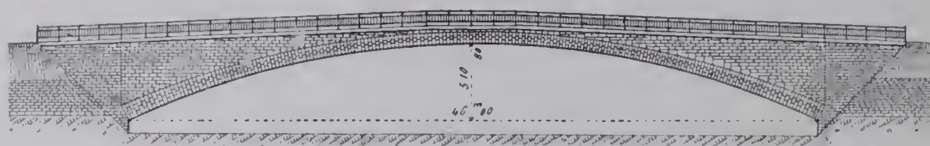
S_2. — Renseignements qu'a bien voulu me donner M. Lau « Landesbaurat » à Breslau.

4. — PONT SUR L'ALME, A ELSEN[1] (*PRUSSE, – Cercle de Paderborn*)

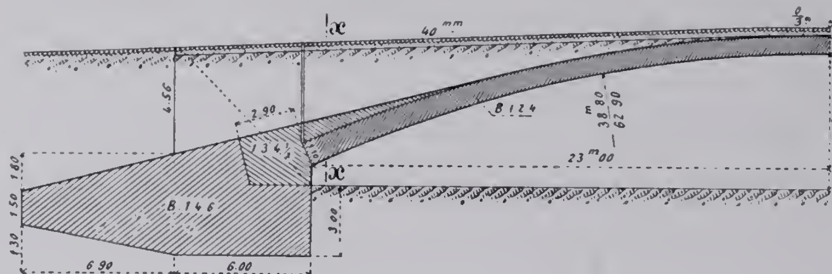
Route de Paderborn à Elsen-Bentfeld

1909-1910

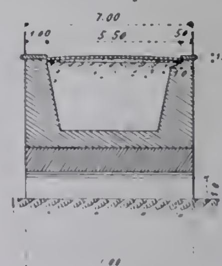
f_1 — Élévation — 2mm



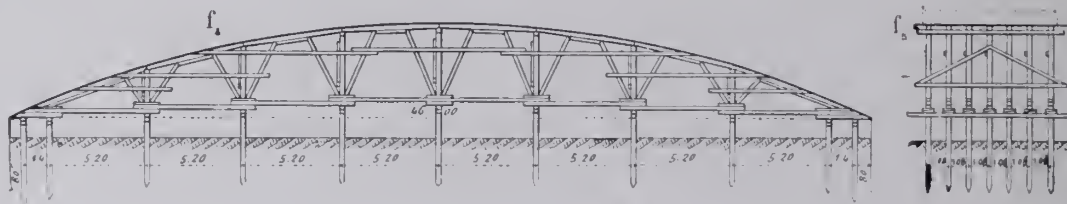
f_2 — Coupe en long — 3mm



f_3 — Coupe en travers sur *xx* de f_2 — 3mm



Cintre — 2mm5



1. Joints de dilatation (S_2). —

Il y en a 8, à égale distance les uns des autres.

2. Dates (S''_1).

Commencement des travaux	Fin octobre 1909
Grande voûte	1re moitié d'août 1910
Décintrement	Commencement d'octobre
Ouverture à la circulation	Fin novembre

1. — près de Paderborn.

Φ_1 (S'''$_1$)



3. Personnel (S''$_1$).

Ingénieurs.

Projet : M. Wehrmann, « Kreisbaumeister » à Paderborn ;
M. B. Liebold, d'Holzminden.

Direction des Travaux : M. Linnenberg.

Entrepreneurs : MM. B. Liebold et Cie, d'Holzminden.

SOURCES :

S$_1$. — Dessins (S'$_1$), renseignements (S''$_1$) et photographie (S'''$_1$) que m'a gracieusement adressés M. B. Liebold, mars 1912.

S$_2$. — Dr Ingenieur F. von Emperger. - Handbuch fur Eisenbetonbau. Zweite neubearbeitete Auflage. Sechster Band. Brückenbau, p. 513 à 515 : « *Strassenbrücke über die Alme* « *bei Elsen* ».

---

5. — PONT SUR LA FULDA, A CASSEL *(PRUSSE)*

Rue reliant la vieille Ville à la nouvelle

1909-1910

Φ_1 (S'''_1)



1. Parements vus. — Les bandeaux et tympans sont en pierre de taille (grès jaunâtre du Mein). Les voussoirs de tête sont en saillie de 6^{cm}.

2. Joints de dilatation. — Il y en a un au-dessus de chaque retombée.

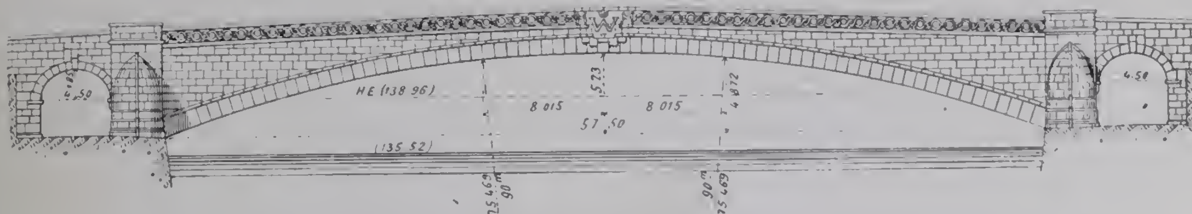
3. Dates.

Commencement des travaux............	Milieu d'avril 1909
Grande voûte.....................	Milieu de juin 1910 - commencement de juillet
Décintrement.........................	Milieu d'août
Ouverture à la circulation.............	Commencement de décembre

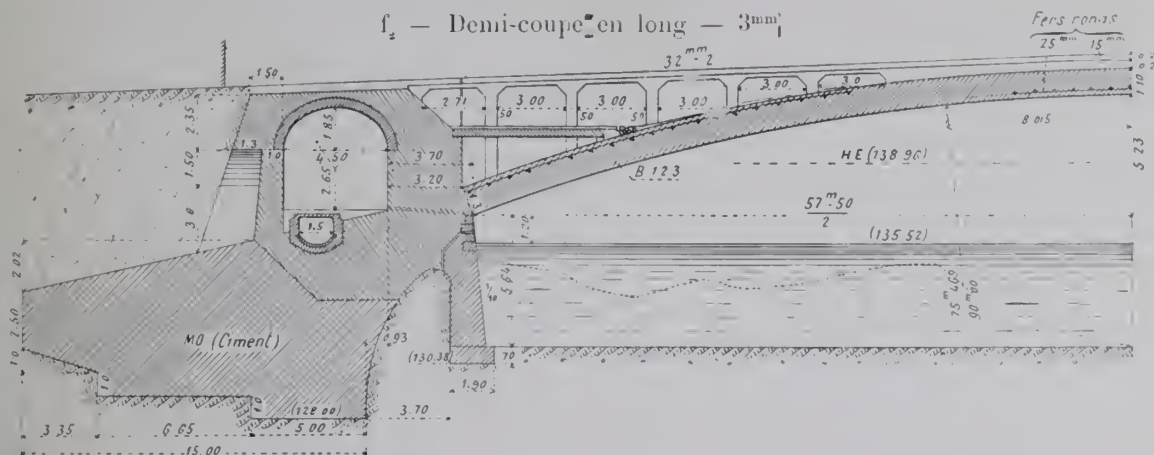
4. Personnel.

Projet et Entreprise : MM. B. Liebold et Cie, d'Holzminden.
Architecture : M. Roth, Architecte à Dresde.
Direction des Travaux : M. Riemenschneider.

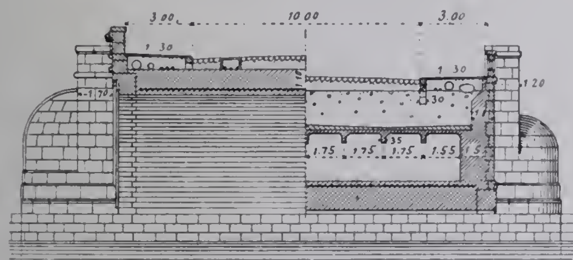
f_1 — Élévation — 2^{mm}



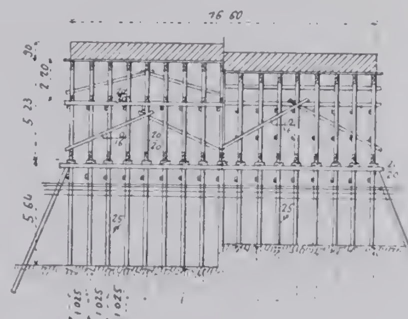
f_2 — Demi-coupe en long — 3^{mm}



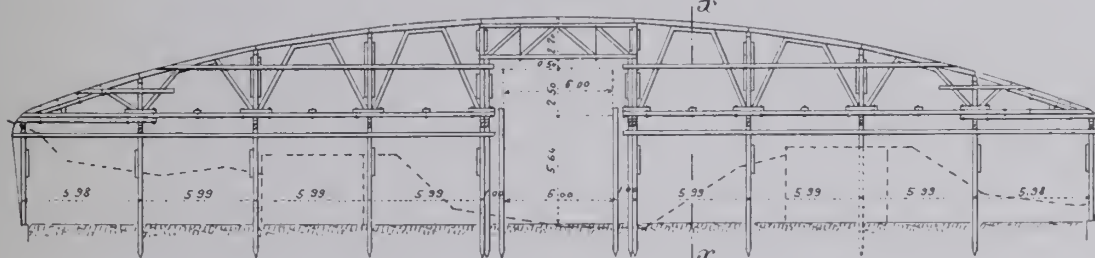
f_3 — Demi-coupes en travers — 3^{mm}
à la clef aux retombées



Cintre
f_5 — Demi-coupes en travers — 2^{mm}5
à la clef sur xx de f_4



Cintre
f_4 — Élévation — 2^{mm}5



SOURCES :

S_1. — Dessins (S'_1), renseignements (S''_1) et photographies (S'''_1), gracieusement communiqués par M. B. Liebold, mars 1912.

S_2. — Dr Ingenieur F. von Emperger. — Handbuch für Eisenbetonbau. — Zweite neubearbeitete Auflage. Sechster Band. Brückenbau, p. 509 à 511 : « *Strassenbrücke über die* « *Fulda in Kassel* ».

TITRE II

VOÛTES INARTICULÉES

DE 40^M DE PORTÉE OU PLUS

TOMBÉES PENDANT QU'ON LES CONSTRUISAIT

1. — PONT DE MARBRE, A PISE *(ITALIE) (indiqué sous toutes réserves*

Arc de 72^m389 (??) tombé en 1644.

« *...le fameux* (pont) *de Pise, essayé par Alexandre Bartolotti d'un seul* « *arc de 124 brasses* (72^m389)[1] *de corde,... étant encore sur le cintre et après une* « *dépense de 25.000 Ducats, tomba en 1644, comme Michelini l'avait prédit...* »[2]

---

2. — PONT DE MANSART, SUR L'ALLIER, A MOULINS *(ALLIER)*

Emporté en 1710 (Arche centrale : 44^m83)

Le pont d'Hardouin Mansart[3], « Surintendant des Bâtiments du Roy », avait 3 arches en anse de panier[4] : une centrale de 23 toises (44^m828), 2 de rive de 17 toises 1/2 (34^m108), 2 piles épaisses de 39 pieds (12^m669).

1. — C'est la portée du Pont de Trezzo, $\widehat{A}^1$ 1re ($\geq 40^m$)^{1}, Tome III, p. 19.

2. — « *De la véritable courbe des arches du Pont de la Trinité à Florence* ». Mémoire géométrique et historique de Pierre Ferroni *. — (Inséré dans le Tome XIV de la Société italienne des Sciences, 1808). Malibran : « *Mission d'Italie, en 1852* ». — (Bibliothèque de l'Ecole des Ponts et Chaussées, M. S, n° 464).

* Ferroni, de Florence (1744-1825), professeur de mathématiques à Pise (Grande Encyclopédie).

3. « *...Il* (Mansart) *fit un pont à Moulins, où il alla plusieurs fois. Il le crut un chef-d'œuvre de* « *solidité; il s'en vantoit avec complaisance. Quatre ou cinq mois après qu'il fut achevé, Charlus, père du* « *duc de Lévi, vint au lever du roi, arrivant de ses terres tout proche de Moulins.... C'étoit un homme* « *d'esprit, peu content, et volontiers caustique. Mansart, qui s'y trouva, voulut se faire louer, lui parla* « *du pont, et tout de suite pria le roi de lui en demander des nouvelles. Charlus ne disoit mot. Le roi,* « *voyant qu'il n'entroit point dans la conversation, lui demanda des nouvelles du pont de Moulins.* « *— Sire, répondit froidement Charlus, je n'en ai point depuis qu'il est parti, mais je le crois bien à* « *Nantes présentement. — Comment ! dit le roi, de qui croyez-vous que je vous parle ? C'est du pont de* « *Moulins. — Oui, Sire, répliqua Charlus avec la même tranquilité, c'est le pont de Moulins qui s'est* « *détaché tout entier la veille que je suis parti, et tout d'un coup, et qui s'en est allé à vau-l'eau...* »
(*Saint-Simon*, Paris, 1856-1857, L. Hachette, volume 4°, p. 133).

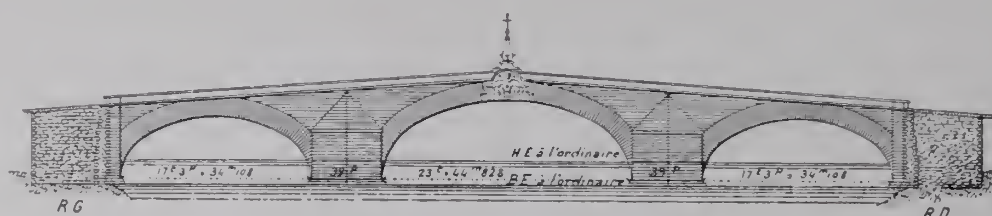
De Régemortes (renvoi 5) spécifie que le pont est tombé le 8 novembre 1710. La conversation rapportée par Saint-Simon est de quelques jours après.
Or, Mansart serait mort en 1708. (Grande Encyclopédie).

4. — D'après des dessins dont l'un, du 20 juillet 1709, est signé comme « vu » par « Mansart de Sagone ».
(Bibliothèque de l'Ecole des Ponts et Chaussées, M. S., n° 1628.)

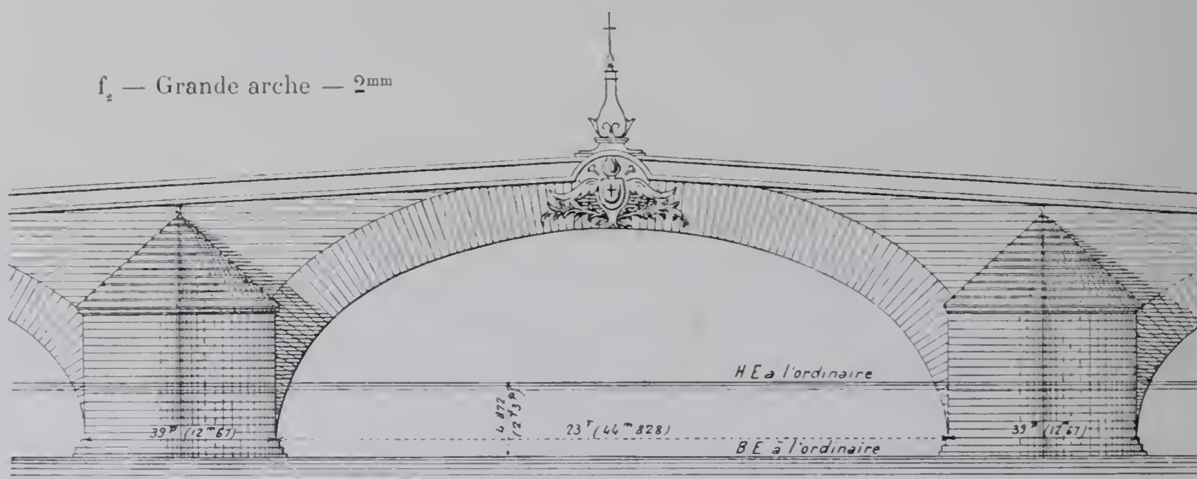
La date et la signature sont d'encre et d'écriture différentes : on a indiqué l'avancement des travaux sur un ancien dessin.

« *La première pierre fut posée le 3 Septembre 1705; les Arches entièrement*
« *fermées étaient encore sur leur ceintre, sans que le dessus du Pont fut achevé;*
« *lorsque le 8 Novembre 1710, une crue occasionna la chûte de la plus grande*
« *partie de cet ouvrage, construit avec un soin & une exactitude tant sur le choix*
« *que sur l'emploi des matériaux, dont il n'y a peut-être point d'exemple.* »[5]

f_1 — Ensemble — 0mm75



f_2 — Grande arche — 2mm



La clef de l'arche centrale était décorée d'un cartouche; au-dessus, devait se dresser une pyramide comme plus tard à Blois (1716-1724).

Tout était fondé sur pilotis; les voûtes étaient construites sur cintre retroussé, du type adopté plus tard par Perronet.

En 1707, les massifs s'élevaient à 3 assises au-dessus des naissances.

Le 20 juillet 1709, les piles étaient montées à mi-hauteur du chaperon: comme plus tard à Blois, l'arrière-bec était en trapèze.

Le débouché total, de 58 toises (113m 04), était tout à fait insuffisant : de là, les affouillements qui ont fait tomber le pont.

Le pont construit plus tard par de Régemortes (achevé en 1763) a 13 arches de 10 toises, soit un débouché de 130 toises (253m 37).

5. — « *Description du nouveau Pont de pierre construit sur la Rivière d'Allier à Moulins, par* « *M. de Régemortes, Premier Ingénieur des Turcies et Levées* ». M. DCC. LXXI. Paris. Imprimerie de Lottin. (Avant-propos, p. I).

3. — PONT SUR LE PANARO, PRÈS DE MODÈNE *(ITALIE)*

Arche de 49m376, tombée en 1789

« *Dans l'Italie entière, il n'y aurait pas eu un pont si extraordinaire et majes-*
« *tueux que celui que Bolognini... voulut de nos jours élever sur le Panaro, le*
« *composant d'un seul arc de 152 pieds de Paris de corde* (49m376), *48 de flèche*
« (15m592) *et 8 d'épaisseur à la clef* (2m599), *sur la nouvelle route de Modène...*
« *mais... quoique moins grand... il eut le même sort sinistre... déjà arrivé à*
« *Bartolotti.* »[6].

Au sujet de cet ouvrage, M. l'Ingénieur en chef Zanotti a bien voulu consulter le Directeur des Archives de Modène, M. Giovanni, lequel lui a donné les renseignements que voici :

Une ordonnance du duc Hercule III, en date du 19 mars 1786, approuva la construction d'un pont à une arche sur le Panaro, de 152 pieds d'ouverture, 48 pieds de flèche, appelé Pont Saint-Ambroise, à construire sous la voie Émilienne, entre Modène et Bologne, à environ 6k de Modène.

On commença les travaux le 24 avril 1788 ; mais, le 24 juin 1789, le cintre céda, entraînant la voûte.

---

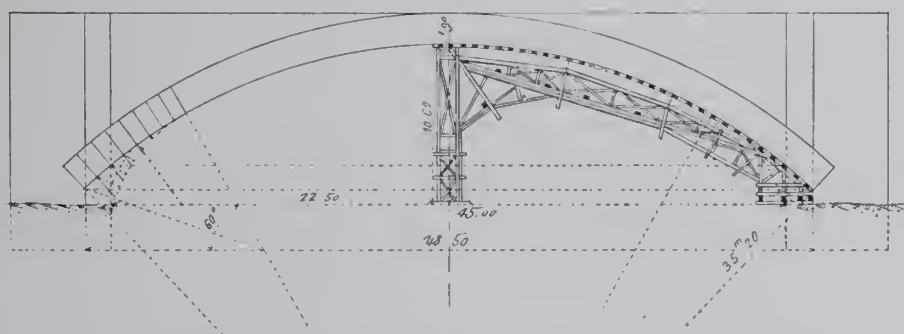
4. — PONT DE SAINT-GEORGES, SUR LE LIRI *(ITALIE)*

Route de Formia à Cassino

Voûte de 45m tombée en 1873[7]

L'entrepreneur devait exécuter l'ouvrage en deux ans, pour 134.000 lires.

f1 — Élévation et Cintre — 2mm



En 1872, on construisit les culées ; en 1873, le cintre et la voûte. On allait la terminer[8], lorsque, dans la nuit du 15 octobre, elle s'écroula avec son cintre.

6. — Source indiquée *renvoi* 2.

7. — « *Sulle cause che produssero la ruina del Ponte in muratura sul Liri presso S. Giorgio.* » Conferenza dell'Ingegnere Pasquale Sasso.
(*Estratto dagli Atti del Collegio degl' Ingegneri et Architetti in Napoli,* Anno V, fasc. 6°. Nov. e Dic. 1880), — Naples, 1880.

8. — « *che, compiuta quasi, ruinò...* »

Il paraît que l'exécution n'a pas été conforme au projet.

Le cintre était d'un mauvais type, en mauvais bois, et mal exécuté [10].

---

10. — Le même entrepreneur construisit, en 1878, un pont de 20m sur le Vulturne : il s'écroula au decintrement. Il subsista, encastrée dans une culée, une plaque de marbre portant son nom.

TITRE III

VOÛTES INARTICULÉES AUXQUELLES ON A ATTRIBUÉ A TORT 40^m DE PORTÉE OU PLUS

III. A. — PONTS QUI EXISTENT, MAIS QUI N'ONT PAS 40^m

1. — PONT SAINT-MARTIN, SUR LE TAGE, A TOLÈDE

(ESPAGNE, — Nouvelle-Castille)

Φ_1 — amont [1]



On lui a attribué une portée de 40^{m}25 [2].

L'ouverture, difficile à mesurer directement, est réellement de 39^{m}75 ; la montée, de 20^{m}45 [3].

1. — Photographie gracieusement donnée en 1908 par M. Carlos Alfonso, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Directeur des Travaux Publics de la Province de Tolède.

2. — Croizette-Desnoyers : « *Construction des Ponts* », Tome I, p. 43, Pl. IV, fig. 8.

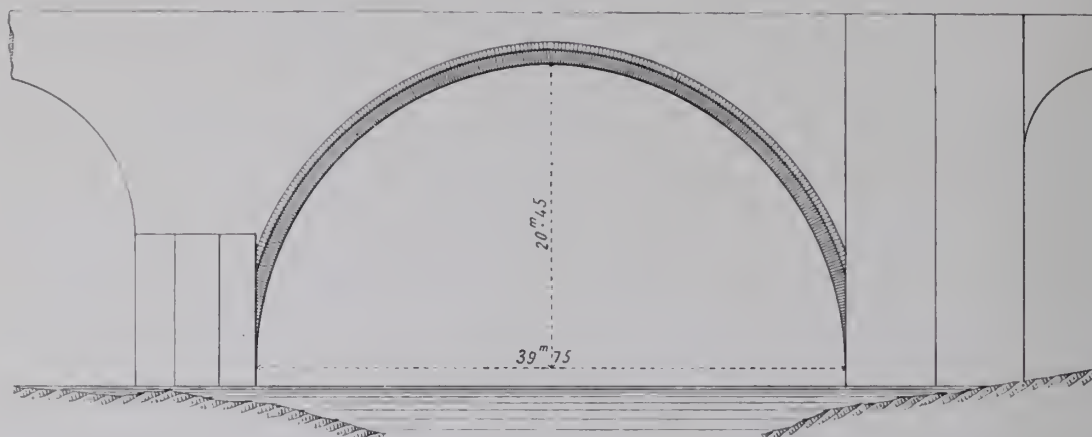
3. — Ces dimensions ont été gracieusement relevées, sur ma demande, en mai 1908, par les soins de M. l'Ingénieur en chef Carlos Alfonso.

C'est la plus grande voûte d'Espagne [4].

L'intrados est une ogive mousse, très peu surhaussée, presque un plein cintre.

Les têtes sont en deux rouleaux superposés, celui de dessus en saillie. Les bandeaux et la douelle sont en granit [5].

f_1 — Grande arche - amont — 2mm



Voici quelques indications empruntées à l'histoire d'un Archevêque de Tolède [6] :

Il y eut là un pont romain, emporté par une crue en 1211 [7] ou en 1203 [8].

4. — Voici les plus grandes voûtes d'Espagne : toutes sont antiques :

	Intrados	Portée	Montée	Siècle	
Pont St-Martin, à Tolède	Ogive surhaussée	39m75	20m45	XIVe	
Pont d'Orense, sur le Miño	id.	37m60	19m60	XIVe ?	Voir sa monographie, p. 311.
Pont de Martorell, sur le Llobregat	Ogive surbaissée	37m30	15m20	?	id. p. 314.
Pont d'Almaraz, sur le Tage (*Province de Cacérès, Route de Madrid à Cacérès*).	Plein cintre Ogive	38m 32m46		XVIe ? restauré en 1842-45	Indications qui m'ont été données, en 1885, par l'Ingénieur de Cacérès. — Croizette-Desnoyers, Tome I, p. 59, Pl. VI, fig. 12.

5. — Renseignement pris, sur ma demande, par M. Renaudot, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

6. — S_1 - « *Historia de D. Pedro Tenorio, Arçobispo de Toledo* » por El. D. (Doctor ?) Eugenio Narbona, natural de la ciudad de Toledo, su Capellan, — Tolède M.DC.XXIIII (Bibliothèque Nationale, Oo. 664).

7. — S_1 - p. 111 (verso) « *comme en témoignent les Annales de Tolède* ».

8. — S_1 - p. 114 (recto).

Inscription sur une plaque de marbre blanc posée sous Philippe II :

PONTEM CVIVS RVINAE INDECLIVI ALVEO PROXIME VISVNTVR. FLVMINIS INVNDATIONE QVAE ANNO DOMINI M.CC.III SVPER IPSVM EXCREVIT DIRVTVM. TOLETANI IN HOC LOCO EDIFICAVERVNT. IN BECILA (sic) HOMINVM CONSILIA. QVEM IAM AMNIS LAEDERE NON POTERAT PETRO, ET HENRICO FRATRIBVS PRO REGNO CONTENDENTIBVS, INTERRVPTVM PETRVS TENORIVS ARCHIEPISCOPVS TOLETAN. REPARANDVM CVRAVIT

Les Toledans en bâtirent un nouveau, un peu en amont, avec 2 tours et 2 portes. Plus tard, demeurés fidèles à Pierre I[er] (le Cruel), ils furent assiégés par son frère Henri de Transtamare, et, pour se défendre, ruinèrent la grande arche [9] de leur pont (1368, 1369 ?).

Don Pedro Tenorio, Archevêque de Tolède de 1376 à 1399, fit reconstruire la grande voûte, achever les tours [9, 10, 11].

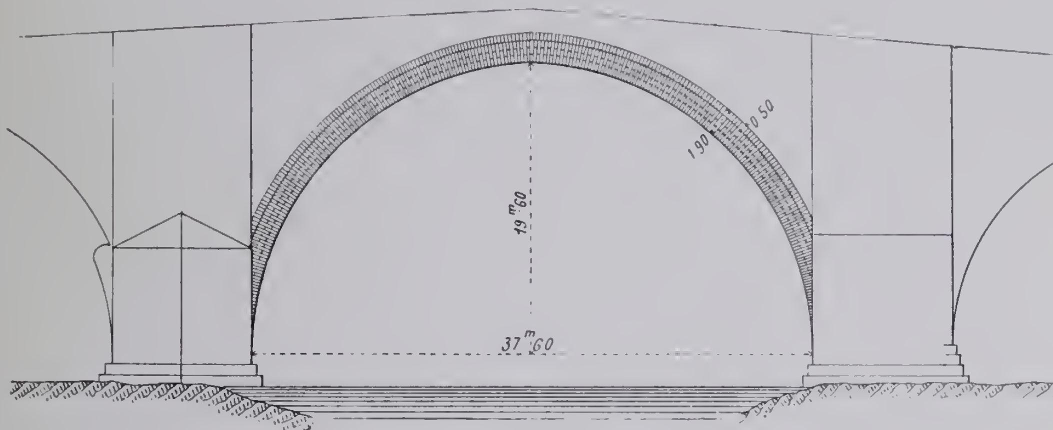
Philippe II y fit quelques réparations.

---

2. — PONT D'ORENSE sur le Miño *(ESPAGNE, - Galice)*

Route de Villacastin à Vigo,
entre la ville d'Orense et le chemin de fer de Monforte à Vigo.

f_1 — Grande arche - aval — 2mm



Le pont d'Orense a 7 arches, dont 5 en ogive.

9. — S_1 - p. 112 (verso).

10. — S_1 - p. 113 (recto). — Eugène de Narbonne conte cette jolie anecdote :

Le Constructeur s'aperçut, la voûte presque clavée, qu'il s'était trompé dans ses projets, et qu'elle tomberait sûrement au décintrement; il confia ses angoisses à sa femme. Celle-ci, jalouse de la réputation de son mari, mit, une nuit, le feu aux bois du cintre ; l'arche s'écroula, mais sa chute fut attribuée à l'incendie.

L'Archevêque répara, à ses frais, le dommage. La femme lui avoua ce qu'elle avait fait, et pourquoi : le Prélat goûta fort son action, et l'en récompensa.

11. — Sur le « Pont de l'Archevêque » s'élevaient deux hautes tours. (Los Reges nuevos de Toledo. Christoval Lozano, 1667. — Bibliothèque nationale. *Ol.* 387. Réserve, p. 267).

On ne les y voit plus.

A la voûte du milieu, on a attribué une ouverture de 44m [12], 43m45 [13], 39m [14].

Elle a, réellement, 37m60 de portée et 19m60 de montée; elle est légèrement surhaussée, en ogive peu pointue, comme celle du pont Saint-Martin, à Tolède.

Φ_1 — Arches centrales, - aval [15].



La base des piles de la grande voûte est à grand appareil, peut-être romain.

Toute l'élévation est du moyen-âge : par les rampes qui étaient de 91mm et 66mm avant la modification de 1880; — par ses ogives, dont quelques-unes ont un joint à la clef; — par le petit appareil de ses voûtes; — par ses becs pointus; — par ses deux rouleaux superposés de 1m40 et 0m50.

Aux reins de la voûte, on voit des trous carrés comme au pont de Céret [16] : sans doute des trous de boulin pour appuyer le cintre.

Tout est en granit : il y a quelques mauvaises pierres.

Ces renseignements ont été, sur ma demande, gracieusement donnés par M. Juan B. Uriarte, Ingénieur des Ponts et Chaussées à Orense.

12. — Germond de Lavigne : « *Itinéraire de l'Espagne* », — Paris, 1866, p. 273. — M. Alfred Léger : « *Les travaux publics, les mines et la métallurgie au temps des Romains.* »

Dans la Statistique des Annales des Ponts et Chaussées d'octobre 1866, p. 542ter, n° 25, j'ai reproduit cette indication « *sous toutes réserves* ».

13. — M. L. Gaztelu, Marquis d'Echandia : « *Los grandes Arcos de Fábrica en los Puentes de España* ». (Revista de Obras Públicas, 12 juin 1899).

14. — Croizette-Desnoyers, « *Construction des Ponts* », Tome I, p. 45.

15. — Photographie qu'a bien voulu remettre M. Juan B. Uriarte.

16. — **C** 1 1ère ($\geqslant$40m) I — Tome I, p. 15.

3. — PONT DU DIABLE, sur le Llobregat[17], a MARTORELL[18]

(ESPAGNE, - Catalogne)

Φ_1 — aval[19]



Voici les dimensions exactes de la voûte[20] :

Portée... 37m30, Montée... 15m20.

C'est une ogive surbaissée, — forme rare et intéressante, — déformée en élévation et en plan. Une petite chapelle en charge utilement la pointe.

D'après l'appareil et le mode de construction, les culées, les bases des piles et l'arc de triomphe de la culée gauche, qui sont en grandes pierres de taille, sont romains. Les voûtes actuelles, en deux rouleaux superposés, et en petits matériaux, sont du Moyen-âge.

17. — et non sur la Noya comme le disent à tort Gauthey (*Construction des Ponts*, Tome I, p. 35), puis Croizette-Desnoyers (*Construction des Ponts*, Tome I, page 43).

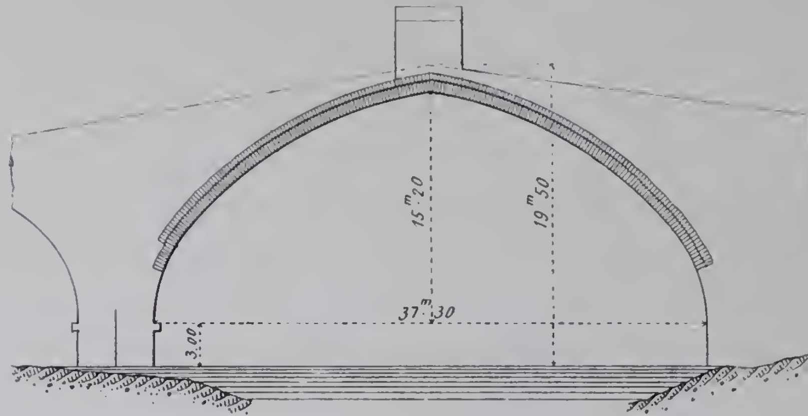
18. — Station du chemin de fer de Barcelone à Tarragone.

19. — Ce que j'ai vu — septembre 1907.

20. — gracieusement relevées sur ma demande, fin 1907, par M. Ortega, Ingénieur des Ponts et Chaussées à la Direction des Travaux Publics de la Province de Barcelone.

L'ouvrage a été restauré en 1768[21].

f_1 — Grande arche, - aval — 2mm



Une inscription de 1768, dans la chapelle de la clef, l'attribue à Annibal[21].

La forme et l'appareil de l'ouvrage ne permettent pas de l'admettre ; l'Histoire non plus[22].

21. — « *Por los años de 535 de la fundación de Roma fuè construído este admirable puente por el « grande Anibal Capitán Cartaginés, è hizo erigir el Arco Triunfal que aun existe á su salida, en honor « de su padre Amilcar. Despues de 1985 años de duración, se hallara esta Fábrica muy mal tratada y en « estado de arruinarse enteramente ; Pero á fin de conservar un Monumento de tan rara antigüedad lo « mandó restablecer en este año de 1768 la Magestad del Señor Don Carlos III Rey de España,...* »

Texte qu'a bien voulu collationner, en 1913, M. l'Alcalde de Martorell.

22. — En effet, d'après l'inscription[21], ce pont aurait été construit 1985—1768=217 ans avant J.-C. (L'inscription admet que la fondation de Rome est en l'an 535+217=752 avant J.-C. — Duruy (« *Histoire des Romains* », vol. 1, p. 7) adopte 754.

En 227, Asdrubal, gendre d'Amilcar, a conquis l'Espagne jusqu'à l'Ebre où les Romains l'arrêtent par un traité. En 221-220, Annibal, qui lui succéda dans le commandement des armées puniques, achève la soumission de l'Espagne jusqu'à l'Ebre.

En 219, il se jette sur Sagonte et l'emporte. Au printemps de 218, il part de Carthagène ; cinq mois après, il est à Turin (Duruy : « *Histoire des Romains* », volume I ; — Polybe : « *Histoire generale* », livres II et III).

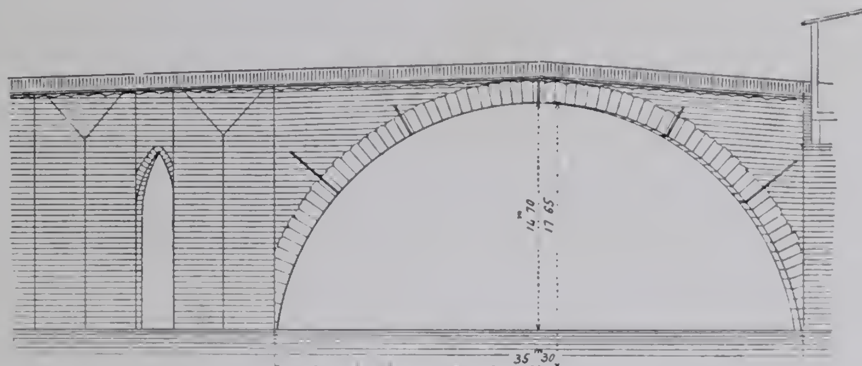
Ainsi, Annibal n'a pu traverser l'Ebre (lequel est encore à 40 lieues au sud de Martorell) avant 219, à cause du traité d'Asdrubal : — ni en 219, à cause du siège de la grande ville de Sagonte qu'il n'emporte qu'après huit mois d'une résistance furieuse, ce qui ne lui a pas permis de distraire une partie de ses forces pour aller, en pays ennemi, où les Romains avaient déjà pris pied, à 80 lieues de Sagonte, faire construire un pont qui a demandé beaucoup plus d'une année et dont il n'avait que faire, puisque le Llobregat est presque partout guéable. En 218 seulement, il franchit l'Ebre, mais pour suivre à marches forcées la route d'Italie. Le pont qu'on lui attribue, étroit et à très fortes pentes, ne permettait pas le passage de sa cavalerie et, encore moins, de ses éléphants.

Après 218, il ne revint plus en Espagne, que fermaient aux armées puniques les victoires des Scipions.

4. — PONT DE VILLENEUVE D'AGEN, SUR LE LOT *(LOT-ET-GARONNE)*

Route Nationale n° 21 de Paris à Barèges

f_1 — Grande arche, - amont — 2^{mm}



Toni Fontenay le donne comme construit en 1732, avec une voûte en plein cintre de 40^{m}43[23].

La grande arche a exactement 35^{m}30[24].

Elle a été construite par Richelieu, en 1642-1643, à la place de deux arches du pont anglais de la fin du XIIIe siècle, emportées en 1636[25].

23. — Toni Fontenay, « *Construction de Viaducs, Ponts-aqueducs, Ponts et Ponceaux en maçonnerie* », Paris, 1852. — Statistique, p. 278, 279, n° 142.

24. — Renseignement gracieusement donné par M. Thérel, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées à Agen (Relevés faits en 1852).

25. — Fernand Cassany de Mazet : « *Histoire de Villeneuve-sur-Lot* », (Bibliothèque Nationale, L⁷. 10430 — A).

III. *B.* — PONTS RUINÉS

1. — PONT sur la Néra, près de NARNI[1] *(ITALIE, - Ombrie)*

Il a été construit par Auguste sur la voie Flaminienne.

Gauthey décrit un viaduc sur la Néra, près de Terni, à 17 arches de 40m en plein cintre, sur piles hautes de 34m [2].

C'était un pont à 4 arches de 20m50[3], 34m75, 15m75, 15m75, ouvertures mesurées sur les dessins de M. Choisy[4].

Les deux naissances de la grande arche sont à des niveaux différents.

« *L'arche rampante de Narni demeure une des plus remarquables conceptions* « *de l'architecture antique*[4] ».

Ç'a été peut-être la plus grande voûte romaine[5].

L'ouvrage a péri parce qu'il était mal fondé[4].

---

2. — PONT DE TRAJAN, sur le Danube[6] *(HONGRIE)*

D'après Perronet, « *le pont construit à Worhel, sur le Danube, en Hongrie,* « *par Trajan, d'après les dessins d'Apollodore de Damas, était composé de* « *20 arches; chacune de 170 pieds d'ouverture en plein cintre* (55m22)[7]... »

Ces assertions sont empruntées en partie à Dion Cassius (Epit., lib. LXVIII-13).

1. — à environ 100k à l'Est de Rome, sur la route d'Ancône.

2. — « *Construction des Ponts* », - Tome I, p. 20, Pl. IV, fig. 68, — Paris 1809.

3. — Arche restaurée. — La route d'Ancône passe dessous.

4. — « *L'Art de bâtir chez les Romains* », p. 139, 140, Pl. XXI, Paris 1873.
La Pl. XXI est reproduite dans la « *Construction des Ponts* » de Croizette-Desnoyers, Tome I, p. 12, et dans les « *Ponts en maçonnerie* » de MM. Degrand et Résal, Tome II, p. 38.

5. — Viendraient ensuite les deux pleins cintres de 28m et 30m du pont d'Alcantara sur le Tage, province de Cacérès, - construit par Trajan en 98. (Croizette-Desnoyers, « *Construction des Ponts* », Tome I, p. 16).

6. — à 21k en aval d'Orsova. Rapport de M. Lalanne, Inspecteur Général des Ponts et Chaussées, Président de la Commission technique pour la construction d'un pont sur le Bas Danube, 30 décembre 1879. (Annales des Ponts et Chaussées 1880, 2e sem. p. 267 à 296.

7. — « *Mémoire sur les moyens de construire de grandes arches de pierre de 200, 300, 400 et jusqu'à* « *500 pieds d'ouverture* », - Art. 105 », — Paris, 1793.

D'après la même source, Gauthey en a établi un dessin. Il spécifie : « *les « pierres qui servirent à construire ce pont étaient énormes*[8] ».

Or, d'après un bas-relief de la Colonne Trajane donnant une vue, d'ailleurs, « *toute conventionnelle* »[9], et d'après une médaille de la Bibliothèque Nationale[10], le pont était en charpente, à 3 cours d'arcs[11, 12].

Il avait 21 travées de près de 36m [6].

---

3. — PONT DE JUSTINIEN, SUR LE FLEUVE SANGARIS *(ASIE-MINEURE)*

Perronet cite : « *L'arche de 200 pieds* (64m97) *d'ouverture en plein cintre « construite par Justinien sur le fleuve Sangaris dans l'Asie-Mineure*[13]... »

Or, le pont de Justinien, près d'Ada-Bazar, est composé de huit arches de 23m au plus, et il n'y a pas en Asie-Mineure d'autre arche antique de grande portée[14].

Ce pont n'est d'ailleurs pas sur le Sakaria (ancien Sangaris), mais sur un affluent, le Tchark-Son.

Il existe, en un point du Sakaria, en amont du confluent avec le Tchark-Son, sur chaque rive, des vestiges d'ancienne maçonnerie. Le Sakaria, très encaissé en ce point, y a de 60 à 70m de largeur ; mais il n'existe aucune trace de route ayant jamais pu y aboutir[15], et il n'est pas vraisemblable que ces ruines soient d'anciennes culées[16].

8. — Gauthey, « *Construction des Ponts* », Tome I, p. 20, Pl. IV, fig. 69.

9. — M. Choisy : « *Art de bâtir chez les Romains* », p. 161, 162.

10. — Reproduites par Duruy : « *Histoire des Romains* », Tome IV, p. 753.

11. — Voir aussi « *La Colonne Trajane d'après le surmoulage exécuté à Rome en 1861 et 1862* » par W. Froehner, Conservateur du Louvre, — Paris, Rotschild, 1871.

12. — M. Choisy en a essayé une restitution. — « *Histoire de l'Architecture* ». Paris. Gauthier-Villars, 1899. Tome I, p. 533.

13. — « *Mémoire sur la recherche des moyens de construire de grandes arches de pierre de 200, 300, « 400 et jusqu'à 500 pieds d'ouverture* », Art. 106, — Paris, 1793.

14. — Renseignements qu'avait bien voulu me fournir M. Galland, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Directeur au Ministère des Travaux Publics à Constantinople.
On trouve un croquis et une description assez complète du pont de Justinien dans l'ouvrage de Charles Texier sur l'Asie-Mineure.

15. — Renseignements fournis par l'Ingénieur résidant à Ada-Bazar, communiqués par M. Sellie, Ingénieur de la Compagnie des Eaux de Constantinople.

16. — Renseignements qu'a bien voulu prendre récemment au Ministère des Travaux Publics de Turquie, M. Louis Godard, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

III. *C.* — PONTS QUI N'ONT JAMAIS EXISTÉ [1]

1. — PONT DE MARBRE, SUR L'ARNO, A FLORENCE *(ITALIE)*

Gauthey en donne un dessin [2], et le décrit ainsi :

« *Ce pont, bâti par Michel-Ange, est composé d'une seule arche en arc de « cercle, de 12m23 d'ouverture et de 9m1 de flèche... La voûte n'a que 1m62 « d'épaisseur à la clef, et la corniche a été taillée dans les voussoirs, après l'affais- « sement de l'arche. Le parapet du pont est formé par des balustres ; cet ouvrage « est d'une telle délicatesse, qu'à une grande distance, l'épaisseur à la clef disparaît « à la vue...* »

Ce pont n'existe pas.

1. — On a cité, comme en maçonnerie, le Pont de Vauxhall, sur la Tamise, à Londres ; il est en acier.

2. — « *Construction des Ponts* ». Paris, 1809. Tome I, p. 23, Pl. I, fig. 17.

LIVRE II

CE QUE L'EXPÉRIENCE

ENSEIGNE DE SPÉCIAL

AUX

VOÛTES INARTICULÉES

TITRE I

COMMENT ON TRACE UNE VOÛTE

CHAPITRE I

PREMIÈRES INDICATIONS

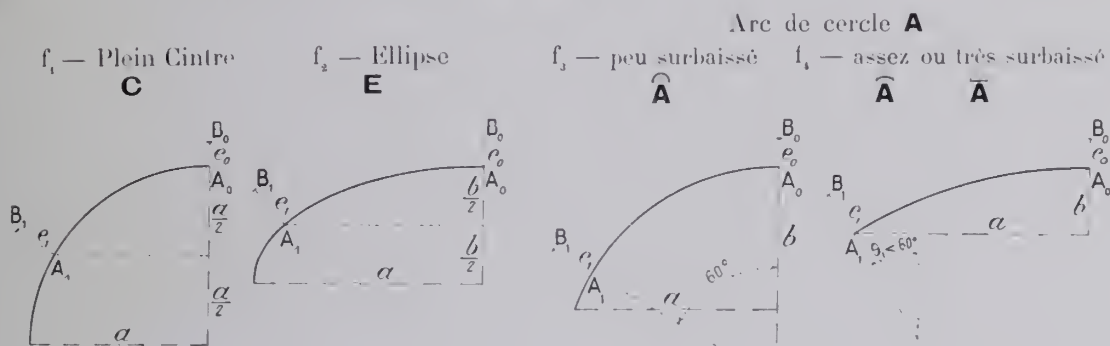
L'intrados adopté, on a, par des formules empiriques, — c'est-à-dire par comparaison avec les voûtes faites, — d'après sa forme, sa portée, sa montée, l'épaisseur à la clef e_0, l'épaisseur e_1 en un autre point.

Cet autre point est :

le milieu de la montée pour les pleins cintres et les ellipses (f_1, f_2) ;

à 60° de la clef, pour les arcs peu surbaisssés $\widehat{\mathbf{A}}$ (f_3) ;

la naissance, pour les autres $\widehat{\mathbf{A}}$, $\overline{\mathbf{A}}$ (f_4).



Ces deux points B_0 B_1 de l'extrados, on les réunit par une courbe qui sera presque toujours un arc de cercle.

On a ainsi, tout de suite, une voûte qui tient.

Cela suffit pour les voûtes courantes.

Mais les grandes, les très surbaissées, celles qu'on veut faire minces, sont tracées d'après leurs charges, leurs surcharges, et même, les variations de température, le vent, le freinage,... de façon à encadrer au mieux les courbes de pression.

Pour l'intrados, on ne s'en tient plus aux courbes usuelles : plein cintre, ellipse, arc de cercle ; on les déforme, on les cambre.

Peu importe que l'équation de la courbe soit simple ou compliquée ; avec un tableau d'abscisses et d'ordonnées, elle s'exécute très facilement.

Dans une voûte mieux tracée, on utilise mieux les matériaux ; on réduit l'épaisseur et, avec elle, le poids et la poussée des voûtes, c'est-à-dire les piles et les culées.

CHAPITRE II

COURBES D'INTRADOS

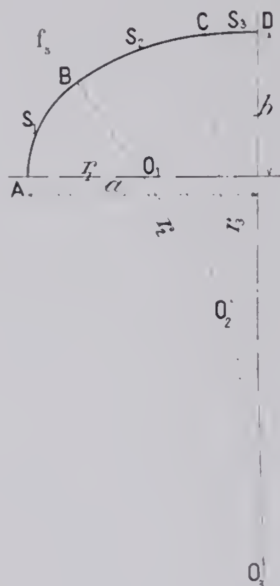
§ 1. — *PLEIN CINTRE* **C**

Le plein cintre est la courbe la plus simple, la plus facile à tracer, à calculer, à exécuter ; la plus connue des entrepreneurs, des charpentiers, des appareilleurs ; celle de la plupart des voûtes romaines (ponts, aqueducs, portes de ville, arcs de triomphe, amphithéâtres,...)[1], des berceaux romans, des arcades de la Renaissance, de presque tous nos ouvrages courants, nos viaducs,...

§ 2. — *COURBES ELLIPTIQUES SURBAISSÉES* **E**

Art. 1. — Anse de panier.

A. - Définition. — Une anse ABCD (f_5) est faite d'une suite d'arcs de cercle S_1, S_2,... tangents entre eux, décrits avec des rayons r_1, r_2,... croissant des naissances à la clef.



Elle est à 3, 5,... $(2n-1)$ centres.

On prend les rayons des naissances et de clef assez grands pour envelopper l'ellipse de mêmes sommets[2].

Pour les courbes peu surbaissées, $\frac{1}{2,5}$, $\frac{1}{3}$, on s'est souvent contenté de 3 centres. Au 1/4, les deux rayons seraient trop différents, les changements de courbure choquants : on augmente le nombre de centres : il y en a 11 au pont de Neuilly.

B. - Tracés d'anses de panier.

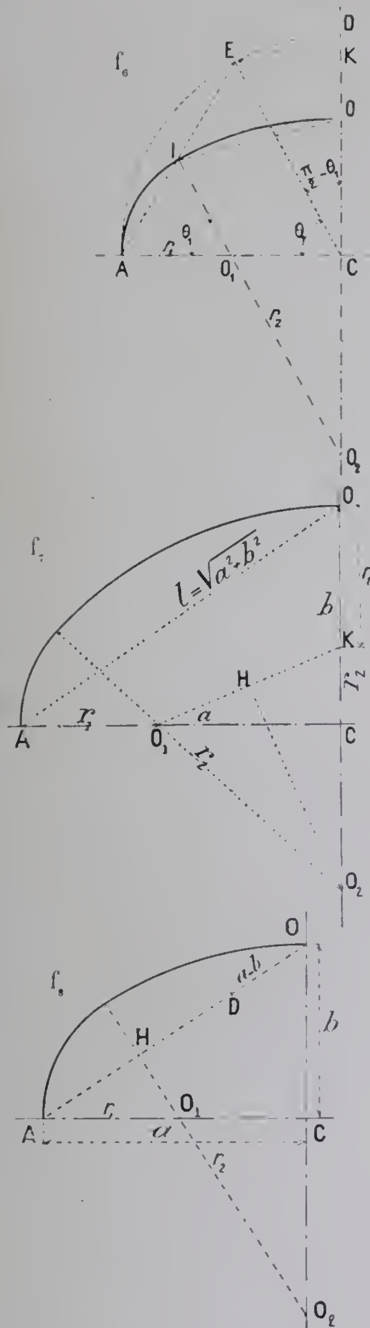
B_1. - à 3 centres. — Bien qu'en pratique on leur doive préférer l'ellipse, j'indique quelques tracés d'anses de panier pour le cas où on en aurait à réparer ou à refaire.

1° - On se donne le 1er angle θ_1 (f_6). — Décrire le 1/4 de circonférence AD. — Tirer les cordes DE, EA. — Mener OI parallèle à DE, puis IO_2 parallèle à CE.

O_1, O_2 sont les centres cherchés.

1. — Les Romains l'ont peut être appris des Étrusques (Choisy : « *Histoire de l'Architecture* », I, p. 247, 513, 539, 587.

2. — Dans le cas de 3 centres, on vérifie facilement que pour avoir $r_2 > \frac{a^2}{b}$, il faut avoir pris $r_1 > \frac{b}{a}\,\frac{a+b}{2}$.



Si $\theta_1 = 60°$, c'est l'ovale de Huyghens.

Si θ_1 est tel que $EK = \frac{1}{2} CK$ (c'est-à-dire $\theta_1 = 63°26'$), c'est l'ovale « antique »[3].

L'ovale antique enveloppe l'anse de Huyghens ; toutes deux enveloppent l'ellipse de mêmes sommets : aux reins, elles sont plus rondes.

2° - *On se donne le premier rayon* r_1 (f_7). — Prendre $OK = r_1$. Joindre O_1K. Élever au milieu H une perpendiculaire à O_1K ; elle donne r_2 [4].

Dans le triangle $O_1 O_2 C$, on a :

$$(r_2 - r_1)^2 = (a - r_1)^2 + (r_2 - b)^2$$

D'où :

$$r_2 = \frac{l^2 - 2ar_1}{2(b - r_1)} \qquad \frac{r_2}{r_1} = \frac{l^2 - 2ar_1}{2r_1(b - r_1)}$$

Ce rapport est minimum pour : $r_1 = \frac{l}{2a}\left[l - (a - b)\right]$

On a alors :

$$r_2 = \frac{al}{l - (a - b)}$$ [4]

Voici, pour avoir r_1, r_2, le tracé indiqué par Bossut[5] (f_8) : il a été fort appliqué.

Sur la corde $OA = l$, prendre $OD = a - b$.

Alors $AD = l - (a - b)$.

Sur le milieu H de AD, lui élever une perpendiculaire : elle donne les deux centres O_1, O_2 [5].

3. — Morandière, p. 173, Pl. 34, fig. 3.
On aurait ainsi courbé des ressorts d'une machine de guerre (Notice et extraits des Manuscrits de la Bibliothèque nationale..., publiés par l'Institut National de France... (Tome 26e, Paris, Imprimerie nationale, MDCCCLXXVII, 2e Partie : « *La Chirobaliste d'Héron d'Alexandrie* », par Victor Prou, Ingénieur civil, p. 154, 155 et 156).

4. — $O_2K = O_2O_1 = r_2 - r_1 = \frac{(a - r_1)^2 + (b - r_1)^2}{2(b - r_1)}$ (triangles semblables O_2HK, O_1KC)

Le minimum de $r_2 - r_1$ est pour $r_1 = b - \frac{1}{\sqrt{2}}(a - b)$

L'anse ainsi tracée est désagréable.

5. — Pour le minimum de $\frac{r_2}{r_1}$, il faut en effet : $r_1 = \frac{OA \times AD}{2\,AC}$.

Or, c'est ce que donnent les triangles semblables AHO_1, AOC.

Cours de Mathématiques, 3e Partie : « *Traité élémentaire de géométrie et de la manière d'appliquer l'algèbre à la géométrie* », par M. l'abbé Bossut, de l'Académie Royale des Sciences,... Paris, Claude Antoine Jombert, Fils Aîné, M.DCC.LXXVII. Page 491 : « *De la meilleure figure des voûtes cintrées en anse de panier à trois centres.* »

B_2. – à plus de 3 centres. — Pour $2n$-1 centres, n rayons, Michal a généralisé[6] la méthode de Huyghens.

Ses anses ont les angles aux centres égaux, soit pour $2n - 1$ centres :

$$\theta = \frac{180^\circ}{2n-1}.$$

Les données sont a, b, $2n-1$, d'où θ.

Sur les n rayons, $n-2$ sont arbitraires : Michal les a calculés pour que l'anse de panier se rapprochât le plus possible de l'ellipse de mêmes axes[7, 8].

Voici ses tables :

Surbaissement $\sigma = \frac{b}{2a}$	Anse de panier à : 5 centres, 3 rayons	7 centres, 4 rayons		9 centres, 5 rayons.		
	$\frac{r_1}{a}$	$\frac{r_1}{a}$	$\frac{r_2}{a}$	$\frac{r_1}{a}$	$\frac{r_2}{a}$	$\frac{r_3}{a}$
0,20	Angle aux centres : $\frac{180^\circ}{5} = 36^\circ$	Angle aux centres : $\frac{180^\circ}{7} = 25^\circ\,42'\,51''$		0,166	0,228	0,443
0,21				0,185	0,251	0,474
0,22				0,203	0,276	0,504
0,23				0,222	0,296	0,535
0,24				0,240	0,318	0,556
0,25		0,265	0,419	0,259	0,341	0,597
0,26		0,289	0,445			
0,27		0,312	0,472	Angle aux centres : $\frac{180^\circ}{9} = 20^\circ$		
0,28		0,336	0,498			
0,29		0,359	0,525			
0,30	0,396	0,383	0,551			
0,31	0,423	0,406	0,578			
0,32	0,450	0,431	0,604			
0,33	0,477	0,455	0,630			
0,34	0,504					
0,35	0,530					
0,36	0,556					

Emploi des tables de Michal. — Tracer une anse à 7 centres, pour $a = 15^m$, $b = 7^m50$ $(\sigma = 0{,}25)$ (f_9).

$\frac{r_1}{a} = 0{,}265$, d'où $r_1 = 3^m990$.

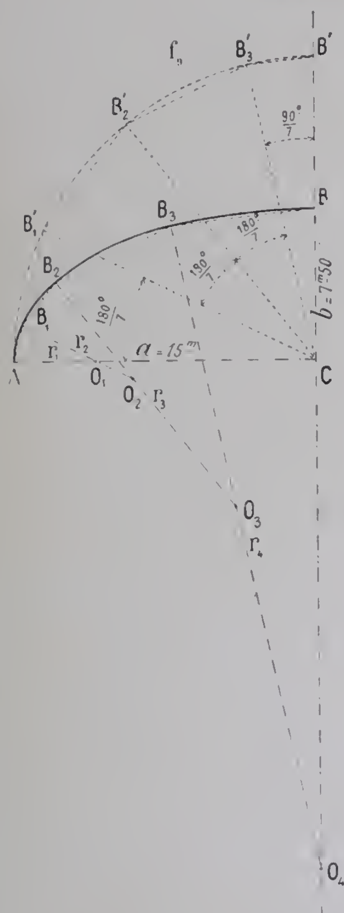
$\frac{r_2}{a} = 0{,}419$, d'où $r_2 = 6^m30$.

6. — Annales des Ponts et Chaussées, 1831, 2e semestre, Tome II, p. 49 : « *Notice sur les courbes en* « *anse de panier employées dans la construction des ponts.* »

7. — « *Dans cette intention nous adopterons pour longueur de chacun de ces rayons le rayon de* « *courbure qui, dans l'ellipse correspondante à l'anse de panier à tracer, partagerait en deux parties* « *égales chacun des arcs de l'anse de panier.* » (Id., p. 52 et 53).

8. — Lerouge (Annales des Ponts et Chaussées, 1839, 2e semestre, Tome II, p. 335) a cherché, lui aussi, à construire des anses très voisines de l'ellipse ; ses rayons croissent en progression arithmétique ; il trouve un nombre excessif de centres (déjà 15, pour $\sigma = 0{,}31$).

Les méthodes Michal et Lerouge ont été résumées dans leur Cours de Ponts : par Morandière p. 172 à 178 (Paris, Dunod, 1874) ; par Croizette-Desnoyers, Tome I, p. 395 à 401 (Paris, Dunod, 1885).



Avec r_1, on place O_1 sur A C ; on décrit l'arc A B_1 de 25°42'51".

$O_1 B_1$ est parallèle à C B'_1.

Avec r_2, on place O_2 sur $B_1 O_1$; on décrit l'arc $B_1 B_2$ de 25°42'51".

$O_2 B_2$ est parallèle à C B'_2, et $B_1 B_2$ à $B'_1 B'_2$.

Puis, comme pour l'anse à 3 centres, on tire $B_2 B_3$ parallèle à $B'_2 B'_3$, BB_3 parallèle à $B' B'_3$.

On mène par B_3 une parallèle à B'_3 C ; elle donne O_3, O_4.

C. - Emploi. — On a fait autrefois grand usage de l'anse de panier[9], parce que l'on considérait comme fort avantageux de tracer l'intrados avec le compas.

Or, on ne trace au compas que le dessin sur le papier. C'est par abscisses et ordonnées que, sauf pour les tout petits ouvrages, on trace l'intrados en vraie grandeur.

Les anses de panier ont, presque toujours, des jarrets ou une brisure aux changements de rayons.

On n'en fait presque plus.

Art. 2. — Ellipse. — Ce n'est guère qu'au XIXe siècle[10], qu'on

9. – On a dit que les voûtes du pont de Toulouse (1543-1632 ?) sont les premières de France en anse de panier.

Au XVIIIe siècle, on a fort employé les anses, très souvent à 3 centres : Ponts de Vizille, Lavaur, Gignac (Tome I, p. 93, 97, 103) ; Ponts de Blois (1716-1724), d'Orléans (1750-1760), de Moulins (1756-1764), de Saumur (1756-1770)....

Dans la 2e moitié du XVIIIe, Perronet a tracé avec 11 centres les arches des Ponts de Mantes (1757-1765), de Nogent (1766-1769), de Neuilly (1766-1774). Celles de Tours (1764-1777) ont aussi 11 centres. Sauf Neuilly, surbaissé au 1/4, les autres ne le sont qu'au 1/3, ou très peu plus.

On trouve encore quelques anses de panier dans la 2e moitié du XIXe siècle, et même après. On a décrit, Tome I : les ponts Annibal (1868-1870) (p. 112) et du Diable (1871-1872) (p. 116), 5 centres ; le pont de Signac (1871-1872), 19(!) centres (p. 131) ; le pont de l'Avenue Edmondson à Baltimore(1908-1909), 3 centres (p. 122), le pont de l'Empereur François à Prague (1898-1901), 7 centres. (p. 168).

10. — Dupuit croit que c'est par ignorance que les anciens constructeurs préféraient l'anse de panier (« *Equilibre des voûtes* », Paris Dunod, 1870, p. 214).

Mais, bien avant le XIXe siècle, on connaissait « l'ovale du jardinier » ; on savait la tracer à l'aide d'un cordeau attaché à ses deux foyers.

Belidor l'indique pour tracer un intrados (« *Architecture hydraulique* », - 2e Partie, Tome II, Livre IV, Chapitre XI, p. 443 ; Paris M.DCC.LXXXX).

J'ai décrit, Tome I, les ponts anglais en ellipse de Gloucester (1826-1827) p. 107, de Londres (1824-1831) p. 147.

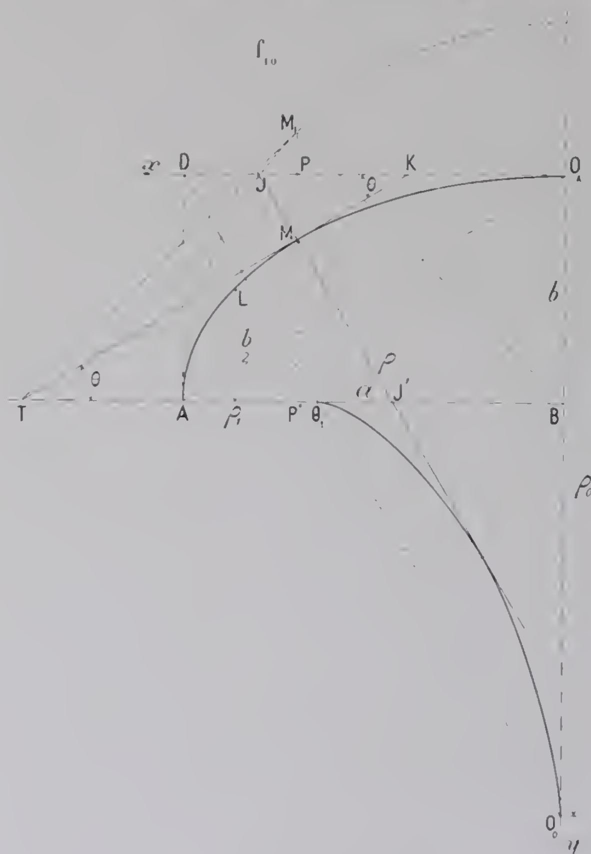
Le pont de Waterloo à Londres (1816-1818) était encore en anse de panier.

En France, ce n'est que dans la 2e moitié du XIXe qu'on commence à employer couramment l'ellipse.

A Paris : Pont de l'Alma (1854-1855) (Tome I, p. 153) ; Pont au Change (1859-1860) ; Pont Louis-Philippe (1860-1862) ; Pont de Bercy (1863-1864).

Sous chemin de fer : Ponts de Chalonnes et de Nantes (1863-1866).

Les premiers grands ponts de chemin de fer (Ponts de Cinq-Mars, 1846-1847, de Port-de-Piles, 1846-1848 ; — les ponts de Morandière : Montlouis, 1843-1845, Plessis-lez-Tours, 1855-1857) étaient encore en anse de panier.



s'est enfin avisé qu'au lieu de construire, assez péniblement, des anses de panier se rapprochant de l'ellipse, il était bien plus simple de calculer les ordonnées d'une ellipse [11].

On a :

Equation $(\mathfrak{f}_{10})$:

$$y = b\left(1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}\right)$$

Tangente

Inclinaison de la tangente sur *ox*, ou de la normale sur *oy*. $\quad \text{Tang}\,\theta = \frac{b}{a^2}\,\frac{x}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}} = \frac{b^2}{a^2}\,\frac{x}{b-y}.$

Sous-tangente PK : $S_t = \frac{a^2 y}{b^2 x}\,(b - y).$

On a de suite la tangente en menant TM_1 tangente en M_1, dont M est la projection, et tirant TM.

Normale

Sous-normale $\quad PJ = \frac{b^2}{a^2}\,\frac{xy}{b-y}.$

$P'J' = \frac{b^2}{a^2}\,x.$ — Elle est proportionnelle à l'abscisse.

On construit, ou on calcule ainsi très facilement les normales.

Milieu de la montée $y' = \frac{b}{2}$

Abscisse : $x' = \frac{a\sqrt{3}}{2}.$

$\text{Tang}\,\theta' = \frac{b}{a}\sqrt{3} = 2\,\sigma\sqrt{3}.$

Sous-normale $= \frac{b^2\sqrt{3}}{2a} = 2\,a\,\sigma^2\sqrt{3}.$

Point pour lequel la normale est à 60° sur la verticale :

$$x = \frac{a^2\sqrt{3}}{\sqrt{3a^2 + b^2}} \qquad y = b\left[1 - \frac{b}{\sqrt{3a^2 + b^2}}\right]$$

11. — Au Tome V, Appendice, on trouvera, dans un extrait des tables de Legendre, le développement des arcs OA et OL.

Rayon de courbure :

en M : $\rho = \frac{a^2}{b} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{b^2}{a^2} \right) \frac{x^2}{a^2} \right\}^{\frac{3}{2}}$

en O : $\rho_0 = \frac{a^2}{b}$

en A : $\rho_1 = \frac{b^2}{a}$

Traçons le rectangle ODAB, sa diagonale OA : sur la perpendiculaire à OA menée par D sont les centres de courbure O_1 ($O_1A = \rho_1$) et O_0 ($O_0O = \rho_0$).

en L (milieu de la montée) : $\rho_1 = \frac{(a^2 + 3b^2)^{\frac{3}{2}}}{8ab}$.

L'enveloppe des normales à l'intrados (sa développée) rapportée à BA, BO est :

$$(aX)^{\frac{2}{3}} + (bY)^{\frac{2}{3}} = (a^2 - b^2)^{\frac{2}{3}}$$

Elle peut servir à tracer rapidement sur le papier les joints des bandeaux.

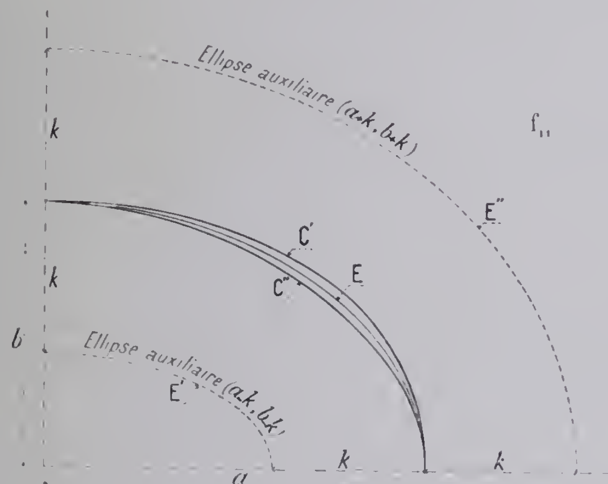
L'ellipse est très gracieuse, surbaissée à plus de 1/3,5, à moins de 1/5.

Le rayon de courbure au sommet, $\rho_0 = \frac{a}{2\sigma}$, augmente vite avec le surbaissement : une ellipse de 40^m au 1/6 a le cerveau d'un plein cintre de 120^m.

Perronet lui a reproché, — à tort, — d'avoir un trop petit rayon de courbure aux naissances $\frac{b^2}{a}$, et d'être difficile à exécuter [12].

Art. 3. — Courbe parallèle à une ellipse. — Soit (f_{11}) une ellipse E (a, b).

Considérons deux ellipses auxiliaires E' ($a - k$, $b - k$), E'' ($a + k$, $b + k$) et traçons, à une distance k, la courbe C' parallèle extérieure à E', la courbe C'' parallèle intérieure à E'' [13].



E, C', C'' ont les mêmes sommets.

C'' est intérieure à E ; C', extérieure.

Leurs rayons de courbure sont :

pour C', ceux de E' augmentés de k ;

pour C'', ceux de E'' diminués de k :

donc :	à la clef	aux naissances	
pour C'	$\frac{(a-k)^2}{b-k} + k$	$\frac{(b-k)^2}{a-k} + k$	plus grands que ceux de E.
pour C''	$\frac{(a+k)^2}{b+k} - k$	$\frac{(b+k)^2}{a+k} - k$	plus petits que ceux de E.

12. — « .... *chaque petite portion de l'ellipse étant d'une courbure différente, son exécution était* « *trop difficile et assujettissante pour les Ouvriers ; et les parties de la voûte elliptique les plus proches des* « *naissances ne s'elevant pas assez à proportion de la clef, opposoient encore trop d'obstacle au cours de* « *l'eau dans le temps des crües......* » (Perronet : « *Description des projets et de la construction des* « *Ponts de Neuilly, de Mantes......* » Tome I, p. 55. Paris, Imprimerie Royale, M.DCCLXXXII).
Perronet, à Neuilly, n'a pourtant pas craint les tracés compliqués.

13. — Une ellipse et toutes ses parallèles ont même développée : on les peut tracer en déroulant un fil enroulé sur cette développée.

On construit facilement C'C'' en ajoutant ou retranchant k aux normales aux ellipses E', E'' : il est assez laborieux de les calculer [14].

On ne se sert pas assez de ces courbes : elles sont agréables ; — le rayon de courbure y croît continuement à partir de la clef ; — elles n'ont pas de faux sommets.

Art. 4. — Ellipse déformée, en ajoutant à ses ordonnées, ou en en retranchant, la différence z entre celles d'un arc et d'une ellipse auxiliaires.

A. - en ajoutant z (Courbes intérieures à l'ellipse). — Dans la monographie du pont des Amidonniers, j'ai indiqué (Tome I, p. 194) comment on peut tracer graphiquement et calculer un intrados de mêmes sommets qu'une ellipse a, b, mais intérieur à elle, en ajoutant à l'ordonnée PM d'un arc de cercle de portée $2a$, de flèche $b - p$, l'ordonnée KN d'une ellipse a, p (f_{13}).

14. — Equation de C', extérieure à l'ellipse E.

Soient (f_{12}). M (x, y) un point de l'ellipse auxiliaire E' ($a - k$, $b - k$) :

$$\frac{x^2}{(a-k)^2} + \frac{y^2}{(b-k)^2} = 1$$

M_1 (X, Y) le point correspondant de la courbe C' parallèle extérieure à E' à la distance k. On a

en fonction de x, y de l'ellipse $a - k$, $b - k$:

$$\begin{cases} X = x + k \cos \alpha \\ Y = y + k \sin \alpha \end{cases} \qquad \operatorname{tang} \alpha = \frac{(a-k)^2 y}{(b-k)^2 x}$$

$$(\mathrm{I}) \begin{cases} X = x + k \dfrac{(b-k)^2 x}{\sqrt{(b-k)^4 x^2 + (a-k)^4 y^2}} \\ Y = y + k \dfrac{(a-k)^2 y}{\sqrt{(b-k)^4 x^2 + (a-k)^4 y^2}} \end{cases}$$

en fonction de φ :

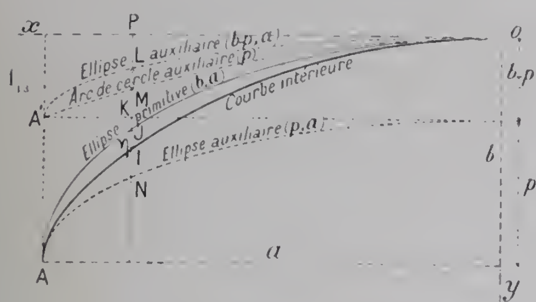
$$\begin{cases} x = (a-k) \cos \varphi \\ y = (b-k) \sin \varphi \end{cases}$$

$$(\mathrm{II}) \begin{cases} X = (a-k) \cos \varphi + k \dfrac{(b-k) \cos \varphi}{\sqrt{(b-k)^2 \cos^2 \varphi + (a-k)^2 \sin^2 \varphi}} \\ Y = (b-k) \sin \varphi + k \dfrac{(a-k) \sin \varphi}{\sqrt{(b-k)^2 \cos^2 \varphi + (a-k)^2 \sin^2 \varphi}} \end{cases}$$

en fonction de $\operatorname{tang} \frac{\varphi}{2} = t$:

$$(\mathrm{III}) \begin{cases} X = (a-k) \dfrac{1 - t^2}{1 + t^2} + k \dfrac{(b-k)(1-t^2)}{\sqrt{(b-k)^2 (1-t^2)^2 + 4t^2 (a-k)^2}} \\ Y = (b-k) \dfrac{2t}{1 + t^2} + k \dfrac{(a-k) 2t}{\sqrt{(b-k)^2 (1-t^2)^2 + 4t^2 (a-k)^2}} \end{cases}$$

On passe de C' à C'' en changeant le signe de k.



$$PI = PM + KN = R\left[1-\sqrt{1-\frac{x^2}{R^2}}\right]+p\left[1-\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}}\right]$$

avec $$R = \frac{a^2+(b-p)^2}{2(b-p)}$$

L'ordonnée PJ de l'ellipse à déformer OJA augmente de : $IJ = \eta = PI - PJ =$

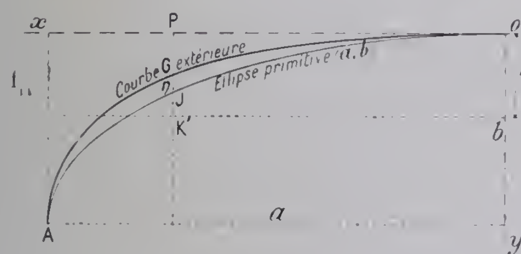
$$= R\left[1-\sqrt{1-\frac{x^2}{R^2}}\right]-(b-p)\left[1-\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}}\right]$$

C'est la différence LM des ordonnées de l'arc OMA' et d'une 2e ellipse auxiliaire OLA' $(a, b-p)$.

En faisant varier p, on peut avoir le rayon de courbure à la naissance de la courbe résultante $\rho_1 = \frac{p^2}{a}$ [15] aussi petit, par conséquent la courbe aussi pointue que l'on veut.

On obtient ainsi toutes les courbes intermédiaires intérieures à l'ellipse, depuis l'ellipse a, b pour $p = b$, jusqu'à l'arc de cercle pour $p = 0$.

B.- en retranchant η *(Courbes extérieures à l'ellipse).* — Au lieu d'ajouter à PJ la différence $\eta = JI = LM$ (f_{13}), retranchons-la.



On a (f_{14}) : $PG = PJ - \eta = Y'$

$$= (2b-p)\left[1-\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}}\right]-R\left[1-\sqrt{1-\frac{x^2}{R^2}}\right]$$

Posons (comme Tome I, page 194, renvoi 3) :

$$\beta = \sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}} \qquad \gamma = \sqrt{1-\frac{x^2}{R^2}}$$

on trouve :

$$\text{Tang }\theta \left(\begin{array}{l}\text{inclinaison sur } ox\\ \text{de la tang en G}\end{array}\right) = x\left[\frac{2b-p}{a^2\beta}-\frac{1}{R\gamma}\right]$$

$$\rho \text{ (rayon de courbure en G)} = \frac{\left[\beta^2\gamma^2 + x^2\left(\frac{2b-p}{a^2}\gamma-\frac{\beta}{R}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}{\frac{2b-p}{a^2}\gamma^3-\frac{1}{R}\beta^3}$$

	À la clef $x=0 \quad \beta=1 \quad \gamma=1$	Aux naissances $x=a \quad \beta=0$
Tang θ	0	∞
Rayon de courbure	$a^2\dfrac{a^2+(b-p)^2}{pa^2+(2b-p)(b-p)^2}$	$\dfrac{(2b-p)^2}{a}$ c'est celui de l'ellipse $(a, 2b-p)$.

Art. 5. — Projection de chaînette. — On l'a déjà vue aux ponts Boucicaut [16] et d'Orléans [17]. On dira plus loin [18] que c'est la courbe d'équilibre d'une voûte infiniment mince, ayant pour ligne de charge une horizontale.

15. — et non $\frac{p^2}{R}$, erreur typographique de la page 194 du Tome I, déjà signalée à l'Errata du Tome I.

16. — Tome III, p. 243. 17. — Tome III, p. 255. 18. — Tome III, Livre II, Titre III, Chap. II, § 2, art. 4.

$$y = \frac{\alpha m}{2}\left[e^{\frac{x}{m}} + e^{-\frac{x}{m}} - 2\right]$$ [19]

$$\text{Tang}\,\theta = \frac{\alpha}{2}\left[e^{\frac{x}{m}} - e^{-\frac{x}{m}}\right] = \frac{1}{m}\sqrt{y\,(y + 2\,\alpha\,m)}$$

$$\rho = \frac{\left|m^2 + y\,(y + 2\,\alpha\,m)\right|^{\frac{3}{2}}}{m\,(y + \alpha\,m)} \qquad \rho_0 \left(\text{au sommet}\right) = \frac{m}{\alpha}$$

ρ diminue du sommet jusqu'au point $y_1 = m\left[-\alpha + \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{1 - \alpha^2}\right]$, puis croît jusqu'à l'$\infty$: pour y_1, il y a un faux sommet ; il est bon pour l'aspect qu'il soit plus bas que les naissances, soit $y_1 > b$. [20]

Art. 6. — Développante de cercle. — Déroulons à partir de A_0 un fil enroulé sur la circonférence O [21] (f_{16}).

A chaque quadrant $A_0 B_1$, $B_1 B_2$,... correspondent des segments de développante $A_0 A_1$, $A_1 A_2$,..... à forme d'ellipse surbaissée, d'abord à 0,285, puis à 0,414,..... [22]

En un point quelconque, le rayon de courbure est l'arc de la circonférence développé. Il est nul en A_0 ; il croît indéfiniment.

Deux tangentes quelconques à angle droit interceptent des arcs M M', M' M'', M'' M''',.. à forme d'ellipse : M variant, on a tous les surbaissements de 0,285 à 0,50.

Ces arcs sont toujours intérieurs à l'ellipse de mêmes sommets : moins de débouché, moins bon aspect.

Il est très facile de tracer la développante, moins de la calculer.

19. — On peut la calculer avec des tables de fonctions hyperboliques (par exemple celles de Houel, Paris, Gauthier-Villars, 1885).

Sin. hyper. de x : $(Sh\,x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$ Cos. hyper. de x : $(Ch\,x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$

20. — Au pont Boucicaut $b = 5^m$; $y_1 = 5^m22$; au pont d'Orleans $b = 5^m80$; $y_1 = 6^m03$.
On n'y voit pas de faux sommet.

21. — Comme toutes les courbes que l'on peut tracer avec un fil, elle doit être fort anciennement connue. Ferroni * l'indique comme ayant été appliquée aux Ponts sur le Sestaion (ou Sestajone), (2 arches de 23^m935 de portee, 8^m173 de montee), et sur la Lima (Route royale de Pistoie à Modene). « *tous deux* « *dessinés par l'ex-jésuite Ximénès* » **.

(Mémoire géometrique et historique inséré dans le Tome XIV de la Société italienne des Sciences, 18[illegible] : « *De la véritable* « *courbe des arches du pont de la Trinité, à Florence* »).

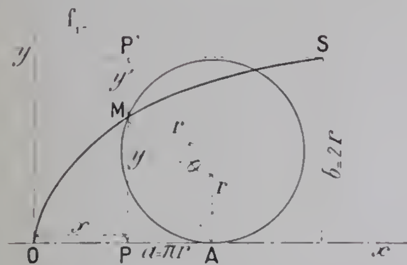
* Ferroni (Pierre), Florentin (1744-1825), professeur de mathématiques à Pise (Grande Encyclopédie).

** Ximénès (Léonard), Italien (1716-1786).

22. — Pour un quadrant d'ordre n, le surbaissement est : $\frac{1}{2} \times \frac{n\pi - 2}{(n-1)\pi - 2}$

Art. 7. — Cycloïde [23, 24] (f_{17}). Projection de cycloïde.

— La cycloïde est surbaissée à $\frac{1}{\pi}$: la portée impose la montée.



$$x = r\,(\theta - \sin\theta) \qquad y = r\,(1 - \cos\theta)$$

$$\frac{dy}{dx} = \text{cotang}\,\frac{\theta}{2}$$

M A est normale en M.

L'enveloppe des normales est la même cycloïde, abaissée de $2\,r$, puis déplacée de $\pi\,r$.

$$\rho\ (\text{en M}) = 4\,r\,\sin\frac{\theta}{2} = 2\ \text{MA} \qquad \text{arc SM} = 2\sqrt{2\,r\,y'}$$

Elle est à peine verticale aux naissances ($\rho_0 = 0$) : l'aspect est médiocre [24].

x et y de la cycloïde en fonction de θ (f_{17})

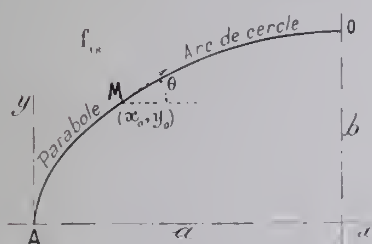
θ en degrés	θ en longueur d'arc de circonférence de rayon 1	$\sin\theta$	$\cos\theta$	$\frac{x}{r} = \theta - \sin\theta$	$\frac{y}{r} = 1 - \cos\theta$
0°	0	0	1	0	0
15°	0,26180	0,25882	0,96593	0,00298	0,03407
30°	0,52360	0.5	0,86603	0,02360	0,13397
45°	0,78540	0,70711	0,70711	0,07829	0,29289
60°	1,04720	0,86603	0,5	0,18117	0,5
75°	1,30900	0,96593	0,25882	0,34307	0,74118
90°	1,57080	1	0	0,57080	1
105°	1,83260	0,96593	0,25882	0,86667	1,25882
120°	2,09440	0,86603	0,5	1,22837	1,5
135°	2,35619	0,70711	0,70711	1,64908	1,70711
150°	2,61799	0.5	0,86603	2,11799	1,86603
165°	2,87979	0,25882	0,96593	2,62097	1,96593
180°	3,14159	0	1	3,14159	2

Multiplions ses ordonnées par $\frac{k}{r}$: $\quad x = r\,(\theta - \sin\theta) \qquad y = k\,(1 - \cos\theta)$

Le surbaissement est $\frac{k}{\pi\,r}$: par k, on en dispose.

Art. 8. — Courbes elliptiques composées de deux courbes.

A. – *Arc de cercle au cerveau, parabole aux reins* (f_{18}). — L'arc de cercle du cerveau est continué aux reins par une parabole du 3ᵉ degré osculatrice [25, 26] : $y^2 = A\,x + B\,x^2 + C\,x^3$



On écrit : qu'elle passe par le point M ; qu'en M, elle a même tangente et même rayon de courbure que le cercle.

Si l'on veut une condition de plus, on ajoute un terme $D\,x^4$.

Φ_1 – Intrados en cycloïde



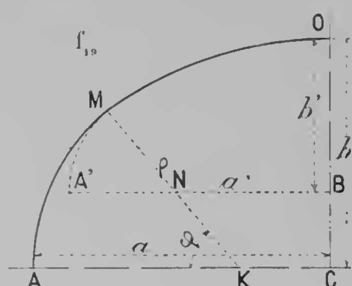
23. — Petit pont en Etrurie sur le torrent Arzana (Ferroni, loc. cit., renvoi 21).

24. — Passage supérieur de Corabeuf (Φ_1) (Ligne d'Epinac à Dijon, 1901-03) ; projet et construction faciles.

25. — Pont de Valence, Tome I, p. 176. — J'avais proposé cette disposition en 1883 pour le pont de St-Waast sur l'Agoût (Ligne de Montauban à Castres, arche de 65ᵐ), projet qui n'a pas été approuvé.

26. — Au pont de la Croix sur le Doubs (Ligne de Frasne à Vallorbe) on a pris la parabole : $(y - m\,x)^2 - q\,x = 0$ simplement tangente en M (f_{18}) à l'arc du cerveau : elle y a à peu près même rayon de courbure.

B. - Arc d'ellipse au cerveau, arc de cercle aux reins (f_{19}). — Au pont de Mauzac sur la Dordogne[27], on a prolongé l'ellipse du cerveau O M par un arc de cercle M A osculateur en M, ayant son centre K sur la ligne des naissances.

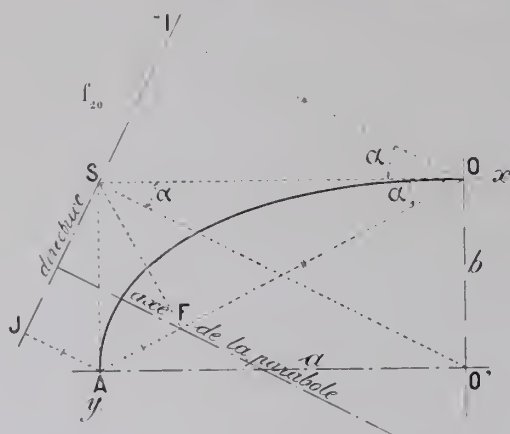


Ce n'est pas à imiter.

Le cercle osculateur, traversant la courbe, donne un jarret au point de tangence.

L'aspect est inférieur à celui de l'ellipse, dont la courbure diminue continuement de la clef aux retombées, le débouché, très peu augmenté.

C. — Deux paraboles tangentes à l'ellipse a, b, *au sommet et aux naissances* (f_{20}).



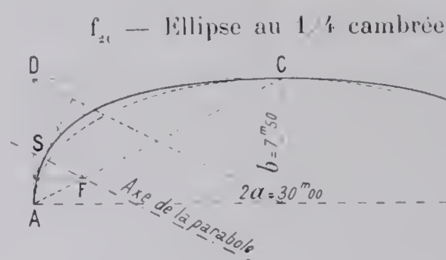
L'équation :

$$\left(\frac{y}{b}-\frac{x}{a}\right)^2-2\left(\frac{y}{b}+\frac{x}{a}\right)+1=0$$

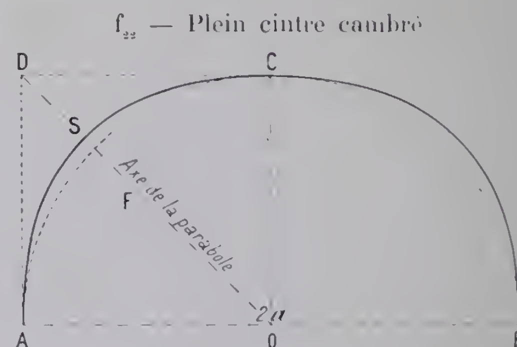
représente une parabole rapportée à Sx et Sy, tangente en O à Sx, en A à Sy [28, 29].

Les deux paraboles symétriques, tangentes en O, font une courbe elliptique qui enveloppe l'ellipse a, b, (f_{21}) le cercle a (f_{22}).

f_{21} — Ellipse au 1/4 cambrée



f_{22} — Plein cintre cambré



27. — Ligne de Bergerac au Buisson (1876-1877).
O M arc d'ellipse d'axes a', b'.
M A arc de cercle de rayon ρ = M K, rayon de courbure en M de l'ellipse a', b'.
Pour les 5 inconnues x, y, ρ, a', b', on a les 5 équations :

$$a'^2 y^2 + b'^2 x^2 = a'^2 b'^2 \qquad \rho = \frac{\left[a'^4 - (a'^2 - b'^2)\, x^2\right]^{\frac{3}{2}}}{a'^4\, b'} \qquad \text{Tang}\ \varphi = \frac{a'^2\, y}{b'^2\, x}$$

$$\rho \sin \varphi + b' - y = b \qquad \rho - \rho \cos \varphi + x = a$$

28. — C'est la parabole que l'on obtient en divisant en m parties S O, S A, et joignant.

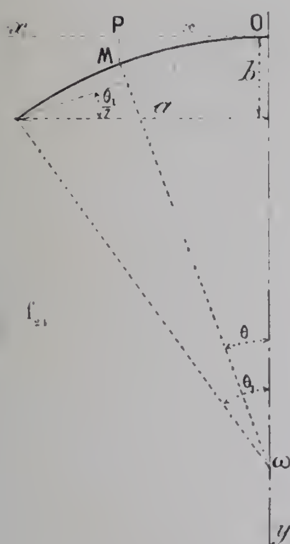
29. — La droite S O' (de coefficient angulaire $\frac{b}{a}$) est parallele à l'axe.
La directrice passe par S (angle droit circonscrit), est perpendiculaire à S O'.
Elle est polaire du foyer F. Donc F est sur O A.
J'abaisse S F, perpendiculaire sur O A. — S O I, S O F sont égaux (S O commun. — angles egaux).
Donc O I = O F. F est le foyer.

§ 3. — *COURBES ELLIPTIQUES SURHAUSSÉES* E_h [30, 31]

On a construit en anse de panier surhaussée : au XVIIIe siècle, le pont de Ronda (Andalousie) ; en 1846-51, les viaducs sur le Gœltzsch et sur l'Elster (Ligne de Leipzig à Hof)[32] ; tout récemment le pont de Wiesen[33].

C'est la courbe des souterrains à une voie.

Comme pour les voûtes surbaissées, on doit à l'anse de panier préférer l'ellipse, qui est à courbure continue, qui n'a pas de jarrets, et qui, tout compte fait, est d'emploi plus facile.



§ 4. — *ARCS SURBAISSÉS* A

Art. 1. — Arc de cercle. — C'est une courbe très simple, très facile à tracer, à exécuter ; très naturelle, — même plus que le plein cintre, — entre deux berges.

C'est celle de très anciens ponts[34].

On a (f_{24}) :

$$b = 2\,a\,\sigma \qquad \operatorname{tang}\frac{\theta_1}{2} = \frac{b}{a} = 2\,\sigma$$

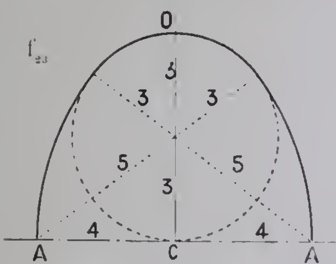
$$R = \frac{a^2 + b^2}{2\,b} = \frac{a}{\sin\theta_1} = a\,\frac{1 + 4\,\sigma^2}{4\,\sigma}$$

Pour un point M : $y = R\left(1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}}\right)$

$$x = R\sin\theta$$

$$y = R\,(1 - \cos\theta) = 2\,R\,\sin^2\frac{\theta}{2}$$

Au Tome V, APPENDICE, on trouvera des tables numériques.



30. — Les ovales surhaussés sont fort anciens. Ont été tracés d'après le triangle égyptien (triangle rectangle 3, 4, 5 $\left(\sigma = \frac{6}{8} = 0{,}75\right)$ (f_{23}) : les berceaux du Ramesseum en Égypte ; plus tard, de Firouz-Abad en Perse (Choisy : « *Histoire de l'Architecture* », Tome I, p. 53 et 123).

31. — Le berceau de l'église de Tournus est en anse de panier surhaussée. (id., Tome II, p. 149).

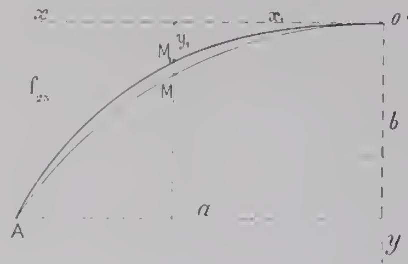
32. — Annales des Ponts et Chaussées, 1853, 1er semestre, p. 241 : Notes recueillies en 1851, pendant sa mission en Allemagne, par M. de Villiers, Ingénieur des Ponts et Chaussées.

Les arches centrales sont en anse de panier surhaussée à 3 centres (id., p. 253).

	Hauteur au-dessus du lit.	Arche centrale (Étage supérieur)		
		Portée et rayon aux naissances.	Montée	Rayon du cerveau
Viaduc sur le Gœltzsch	80m34	30m87	20m39	14m15
Viaduc sur l'Elster	69m68	30m59	19m50	14m40

33. — Tome I, p. 235.

34. — Sont en arc peu surbaissé : le pont Fabricius, à Rome (An 63 avant J.-C.) (Raynaud : « *Traité d'Architecture, — Edifices* », p. 492, Pl. 69) ; les ponts de Nyons, de Tournon (XIVe siècle) (Tome II, p. 25, p. 35) ; d'Avignon (XIIe), de la Guillotière (XIIIe), de Pont-Saint-Esprit (XIIIe) (Tome II, p. 25, renvois 3, 4, 5).



Art. 2. — Arc d'ellipse.

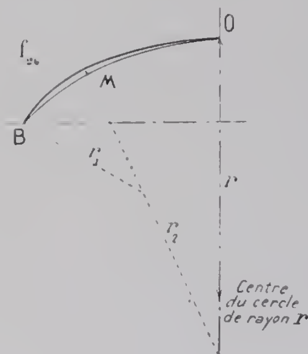
— Proposons-nous de cambrer l'arc de cercle O M A (f_{25}) suivant un arc d'ellipse O M_1 A passant par un point M_1 (x_1, y_1), choisi d'ordinaire vers les 70/100 de la 1/2 portée à partir de la clef.

Pour que l'arc d'ellipse :

$$y = b'\left(1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{a'^2}}\right)$$

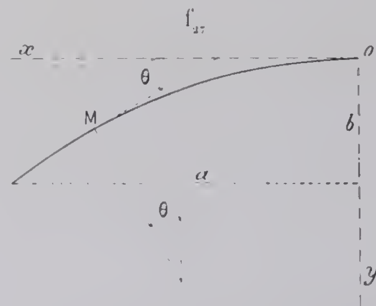
passe par les points M_1 et A, il faut :

$$a' = \frac{b^2 x_1^2 - y_1^2 a^2}{2\sqrt{y_1\, b\,(b - y_1)\,(b\, x_1^2 - y_1\, a^2)}} \;[35] \qquad b' = \frac{b^2 x_1^2 - y_1^2 a^2}{2\,(b\, x_1^2 - y_1\, a^2)}$$



Art. 3. — Arc d'anse de panier.

— On a cambré en anse de panier des arcs O M B (f_{26}) [36].



Art. 4. — Arc de la courbe

$$y = b'\left(1 - \sqrt[n]{1 - \frac{x^2}{a'^2}}\right).$$

Elle a 3 paramètres a' b' n [37].

La courbe doit passer par les naissances a, b.

On dispose de deux conditions : par exemple

35. — En prenant, au Pont Boucicaut, Tome III, p. 243, x_1 = 70/100 de la 1/2 portée et l'y_1 de la projection de chaînette adoptée, on trouve : a' = 24^m219 b' = 11^m44.

L'écart maximum entre les deux courbes est ± 31^mm.

Le rayon de courbure à la clef est : pour l'ellipse, 51^m27 ; pour l'intrados adopté, 53^m90 ; pour l'arc de cercle, 42^m50.

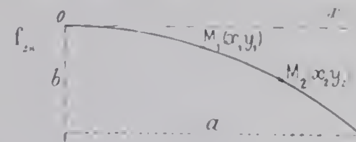
36. — Ponts allemands, en arcs très surbaissés, **Ā** r^te (> 40^m), Tome III :

	r_0 Clef	r_1 Naissances		r_0 Clef	r_1 Naissances
Ziegenhals	60^m	25^m676	Mehring	60^m	31^m95
Michelau	50^m	26^m637	Schweich	60^m	31^m95
Schwusen	60^m	40^m	Trittenheim	56^m	33^m55
Krappitz	64^m1	41^m90			

37. — $\text{Tang}\ \theta = \frac{2\,b'}{n\,a'^2} \cdot \frac{x}{\left(1 - \frac{x^2}{a'^2}\right)^{1-\frac{1}{n}}}$

$$\begin{pmatrix}\text{Rayon}\\ \text{de courbure}\\ \text{en M}\end{pmatrix} = \frac{n\,a'^2}{2\,b'}\;\frac{\left[\left(1 - \frac{x^2}{a'^2}\right)^{2-\frac{2}{n}} + \frac{4\,b'^2\,x^2}{n^2\,a'^4}\right]^{\frac{3}{2}}}{\left(1 - \frac{x^2}{a'^2}\right)^{1-\frac{2}{n}}\left[1 - \frac{x^2}{a'^2}\,\frac{n-2}{n}\right]} \qquad r_0\ \text{(au sommet O)} = \frac{n\,a'^2}{2\,b'}.$$

deux points, ou un point et le rayon de courbure au sommet [38].



Art. 5. — Parabole $y = Ax^2 + Bx^4 + Cx^6 + \ldots$

Si on prend 3 termes, on trouve :

Conditions :	3 points $(ab,\ x_1 y_1,\ x_2 y_2)$ (f_{2s})	2 points $(ab,\ x_1 y_1)$ et Rayon de courbure au sommet $\rho_0 = \frac{1}{2A}$
A	$\dfrac{a^2 x_1^2 x_2^2 \left\{ \frac{b}{a^4}\left(x_2^2 - x_1^2\right) + \frac{y_1}{x_1^4}\left(a^2 - x_2^2\right) + \frac{y_2}{x_2^4}\left(x_1^2 - a^2\right) \right\}}{(a^2 - x_1^2)\ (x_1^2 - x_2^2)\ (x_2^2 - a^2)}$	$\dfrac{1}{2\rho_0}$
B	$-\dfrac{\frac{b}{a^2}\left(x_2^4 - x_1^4\right) + \frac{y_1}{x_1^2}\left(a^4 - x_2^4\right) + \frac{y_2}{x_2^2}\left(x_1^4 - a^4\right)}{(a^2 - x_1^2)\ (x_1^2 - x_2^2)\ (x_2^2 - a^2)}$	$\dfrac{a^6 y_1 - x_1^6 b}{a^4 x_1^4 (a^2 - x_1^2)} - \dfrac{a^2 + x_1^2}{2\rho_0 a^2 x_1^2}$
C	$\dfrac{\frac{b}{a^2}\left(x_2^2 - x_1^2\right) + \frac{y_1}{x_1^2}\left(a^2 - x_2^2\right) + \frac{y_2}{x_2^2}\left(x_1^2 - a^2\right)}{(a^2 - x_1^2)\ (x_1^2 - x_2^2)\ (x_2^2 - a^2)}$	$\dfrac{b x_1^4 - y_1 a^4}{a^4 x_1^4 (a^2 - x_1^2)} + \dfrac{1}{2\rho_0 a^2 x_1^2}$

Si on ne prend que deux termes, on trouve :

Conditions	2 points $(ab,\ x_1 y_1)$	1 point (ab), et ρ_0
A	$\dfrac{a^2 \frac{y_1}{x_1^2} - \frac{x_1^2 b}{a^2}}{a^2 - x_1^2}$	$\dfrac{\frac{b}{a^2} - \frac{y_1}{x_1^2}}{a^2 - x_1^2}$
B	$\dfrac{1}{2\rho}$	$\dfrac{1}{a^2}\left(\dfrac{b}{a^2} - \dfrac{1}{2\rho_0}\right)$

Art. 6. — Courbe pour remplacer pratiquement une projection de chaînette. $y = \dfrac{b\,(n^2 - a^2)}{a^2} \cdot \dfrac{x^2}{n^2 - x^2}$.

— Les intrados des ponts Boucicaut [39], d'Orléans [40], d'Avignon [41], sont en projection de chaînette, d'équation assez peu maniable : celle-ci, beaucoup plus simple, en est fort rapprochée [42].

38. — Au pont de Luxembourg, on a écarté l'ellipse $y = 34{,}907 \left[1 - \sqrt{1 - 0{,}00055\, x^2}\right]$ et adopté : $y = 141{,}2981 \left[1 - \sqrt[6]{1 - 0{,}0004\, x^2}\right]$ (Tome II. p. 68).
Les rayons de courbure sont :
à la clef $\rho_0 = 53^m08$; aux retombées $\rho_1 = 42^m19$ (Tome II, p. 60).
La courbe enveloppe un arc de cercle de 48^m10 de rayon.

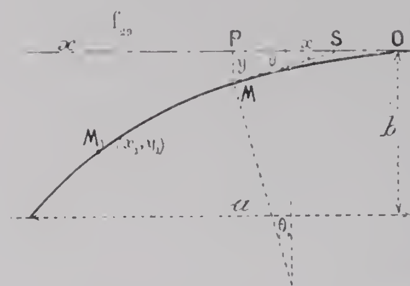
39. — Tome III, p. 243. 40. — Id., p. 255. 41. — Id., p. 270.

42.

	a	b	n^2	$m = \dfrac{b(n^2 - a^2)}{a^2}$	Ecart maximum en 0^m001 par rapport à la courbe adoptée.
Pont Boucicaut (Tome III, p. 243)	20^m	5^m	1661,09	15,77161	11^{mm}
Pont d'Orléans (id., p. 255)	21^m925	5^m79	2918,998	29,440556	31^{mm}

On trouve (f_{29}) :

Tang $\theta = \dfrac{2\,n^2\,b\,(n^2-a^2)}{a^2}\cdot\dfrac{x}{(n^2-x^2)^2}$ Sous tang P S $= \dfrac{y}{\text{tang}\,\theta} = \dfrac{x\,(n^2-x^2)}{2\,n^2}$



ρ (rayon de courbure en M) $= \dfrac{\left[(n^2-x^2)^4 + \dfrac{4\,n^4\,b^2\,(n^2-a^2)^2}{a^4}\,x^2\right]^{\frac{3}{2}}}{\dfrac{2\,n^2\,b\,(n^2-a^2)}{a^2}\,(n^2+3\,x^2)\,(n^2-x^2)^3}$

Pour $x = 0$ ρ_0 (rayon de courbure au sommet O) $= \dfrac{n^2\,a^2}{2\,b\,(n^2-a^2)}$

Pour $x = a$ ρ_1 (rayon de courbure à la naissance A) $= \dfrac{\left[(n^2-a^2)^2\,a^2 + 4\,n^4\,b^2\right]^{\frac{3}{2}}}{2\,n^2\,a\,b\,(n^2-a^2)\,(n^2+3\,a^2)}$

Pour définir n^2, on peut se donner :

soit ρ_0 : alors :

$$n^2 = \frac{2\,\rho_0\,b\,a^2}{2\,\rho_0\,b - a^2} \qquad\qquad y = \frac{b\,x^2}{2\,\rho_0\,b\left(1-\dfrac{x^2}{a^2}\right)+x^2}$$

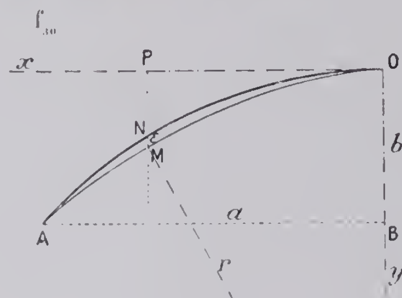
soit un point M_1 (x_1, y_1) ; alors :

$$n^2 = \frac{a^2\,x_1^2\,(b-y_1)}{b\,x_1^2 - a^2\,y_1}$$

y, tang θ, ρ sont ∞ pour $x = n$. On s'assurera qu'entre O et A, il n'y a pas de faux sommet.

Art. 7. — Arc de cercle cambré en retranchant quelque chose de chaque ordonnée.

— Soit (f_{30}) un arc :



$$y = \text{M P} = r\left(1-\sqrt{1-\frac{x^2}{r^2}}\right)$$

Retranchons la quantité :

$$\text{M N} = \varepsilon = k\,x^m\,(a-x)^n \text{ [43, 44]}.$$

Pour $x = \dfrac{m\,a}{m+n}$, ε a son maximum, qui est :

$$\text{Max } \varepsilon = k\,\frac{m^m\,n^n\,a^{m+n}}{(m+n)^{m+n}}.$$

43. — On a fait ainsi au pont de Saint-Loup sur l'Allier (Ligne de la Ferté-Hauterive à Gannat) (7 arcs de 33m à 1/7,5), $\varepsilon = k\,x^4\,(a-x)^2$.

Pour l'intrados, $k = \dfrac{330}{10^9}$; ε atteint 0m15 aux 2/3 de la 1/2 portée à partir de la clef.

Pour l'extrados, $k = \dfrac{247}{10^9}$.

44. — L'équation de la courbe cambrée est :

$$\text{Y} = r\left(1-\sqrt{1-\frac{x^2}{r^2}}\right) - k\,x^m\,(a-x)^n.$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{x}{\sqrt{r^2-x^2}} - k\,x^{m-1}\,(a-x)^{n-1}\,(m+n)\left[\frac{m\,a}{m+n}-x\right].$$

On vérifie que :

la courbe déformée et l'arc de cercle ont même tangente et même rayon de courbure pour : $x = 0$ si $m > 2$, $x = a$ si $n > 2$;

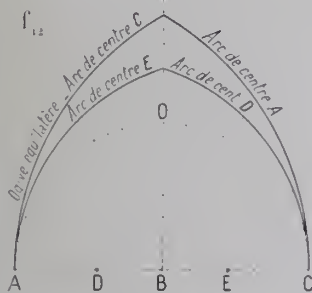
des tangentes parallèles au point où l'écart est maximum, c'est-à-dire pour $x = \dfrac{ma}{m+n}$

A partir de la clef, le rayon de courbure diminue, puis augmente jusqu'à r, aux naissances.

Il y a un faux sommet, mais très peu apparent.

§ 5. — *OGIVES* [15] O

Art. 1. — Ogive surhaussée. — C'est l'ogive des cathédrales [16].



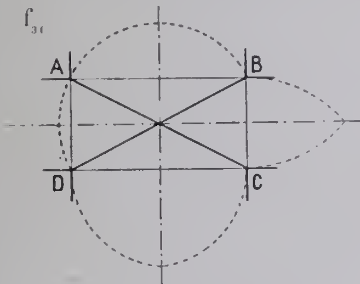
Sur la ligne des naissances A C (f_{32}), prenons, à égale distance du milieu B, deux points D, E, comme centres des arcs de rayon D C, E A. Plus D et E seront loin de B, plus l'ogive sera haute et pointue. S'ils se confondent avec les naissances A et C, l'ogive est équilatère [17, 18].

Art. 2. — Ogive surbaissée. — J'ai cité (Tome III, p. 313) le pont de Martorell sur le Llobregat :

$$2\,a = 37^{m}30\,; \qquad b = 15^{m}30\,; \qquad \sigma = 0{,}56$$

15. — Sont déjà en ogive, par assises horizontales empilées en surplomb : le Dôme d'Abydos (Egypte) (Choisy : *Histoire de l'Architecture,* Tome I, p. 19, 20) ; le « Trésor d'Atree », à Mycènes (Id., p. 231 ; — Raynaud : « *Art de bâtir* », p. 356, Pl. 44).

L'ogive remonte, en Syrie, à l'antiquité romaine (Choisy, Tome II, p. 29). Elle paraît avoir été importée de Syrie vers la fin du XIe siècle par les pèlerins et les Croisés (Id., p. 512).



16. — Soit A B C D (f_{31}) le plan d'une voûte d'arête. Les arcs diagonaux A C, B D étaient presque toujours en plein cintre, les arcs « formerets » A D, B C, les arcs « doubleaux » A B, C D, en courbe brisée.

Or, c'étaient les arcs diagonaux en plein cintre A C, B D, et non les arcs pointus des têtes, qu'au moyen-âge on appelait « augives » (Choisy, II, p. 271).

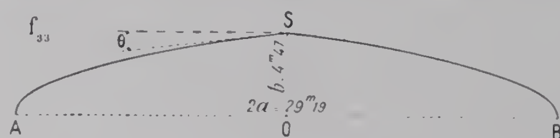
17. — En pratique, on divise A B, B C (f_{32}) en n parties égales : les centres sont les premiers points de division.

On a pris, en Syrie, $n = 8$ (Choisy, II, p. 115) ; en Occident au XIIe siècle, $n = 5$; au commencement du XIIIe, $n = 3$ (ogive tiers-point) ; puis $n = 1$ (ogive équilatère) (Choisy, II, p. 342).

18. — M. Dieulafoy a relevé un grand nombre de ponts persans et indique le tracé d'une ogive assez compliquée, presque inscriptible dans une demi-circonférence. (Annales des Ponts et Chaussées, Juillet 1883 : Notice sur la construction des ponts en Perse, p. 23).

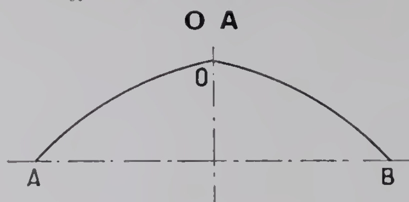
On n'en voit guère l'application à nos intrados : autant adopter le plein cintre, qui a un peu plus de débouché et qui, lui, n'a pas besoin d'être chargé à la clef.

On a profilé en ogive persane les becs des ponts de Charrey, d'Orléans (Tome III, p. 257).

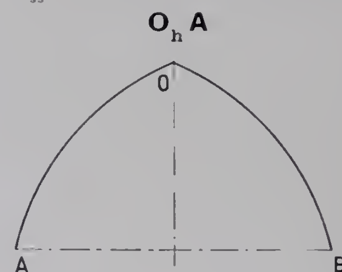


L'intrados du pont de la Trinité à Florence (milieu du XVIe siècle) est fait de deux courbes elliptiques qui se coupent [49, 50] (f_{33}).

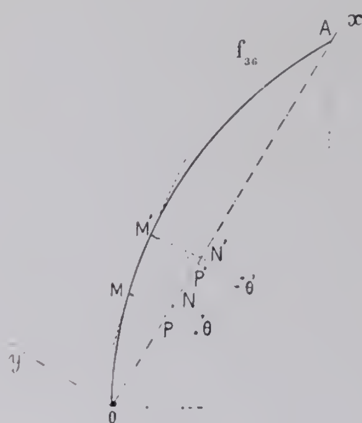
Art. 3. — Arcs brisés. — Pour soutenir un poids isolé en O, on brise l'intrados (f_{34}, f_{35}).



f_{34} — Arc brisé surbaissé



f_{35} — Arc brisé surhaussé



Aux arcs de cercle, on peut substituer une autre courbe, pour mieux encadrer les courbes de pression.

Si l'intrados doit passer par deux points M, M', (f_{36}) on peut adopter la forme :

$$y = \alpha x (1 + \beta x + \gamma x^2)$$

On a fait ainsi à Fontpédrouse (Voir Tome V) [51].

49. — Ferroni, loc. cit. *renvoi* 21.

50. — Soit proposé de construire une ellipse ayant un sommet en A (f_{33}), son grand axe sur AO, et tangente à une droite d'inclinaison θ au sommet S (a, b).

On trouve pour les 1/2 axes inconnus a' et b' :

$$a' = a \frac{b - a \text{ Tang } \theta}{b - 2a \text{ Tang } \theta} \qquad b'^2 = b \frac{(b - a \text{ Tang } \theta)^2}{b - 2a \text{ Tang } \theta}$$

$$\rho_1 \text{ (en A)} = \frac{b'^2}{a'} = \frac{b(b - a \text{ Tang } \theta)}{a}$$

51. — On trouve :

$$\beta = \frac{x_1 y_2 (c^2 - x_1^2) - x_2 y_1 (c^2 - x_2^2)}{c\left[x_2^2 y_1 (c - x_2) - x_1^2 y_2 (c - x_1)\right]}$$

$$\gamma = \frac{x_2 y_1 (c - x_2) - x_1 y_2 (c - x_1)}{c\left[x_2^2 y_1 (c - x_2) - x_1^2 y_2 (c - x_1)\right]}$$

$$\alpha = \frac{y_1}{x_1 \left[1 + \beta x_1 + \gamma x_1^2\right]}$$

En un point M :

$$\text{Tang } \theta = \alpha (1 + 2\beta x + 3\gamma x^2) \qquad \rho_0 = \frac{\left[1 + \alpha^2 (1 + 2\beta x + 3\gamma x^2)^2\right]^{\frac{3}{2}}}{2\alpha(\beta + 3\gamma x)}$$

a l'origine :

$$\text{Tang } \theta_0 = \alpha \qquad \rho_0 = \frac{(1 + \alpha^2)^{\frac{3}{2}}}{2\alpha\beta}$$

CHAPITRE III

ÉPAISSEUR D'UNE VOÛTE

§ 1. — *ÉPAISSEUR A LA CLEF* e_0

Art. 1. — Graphiques de e_0 en fonction de la portée $2a$ et du surbaissement $\sigma = \frac{b}{2a}$.

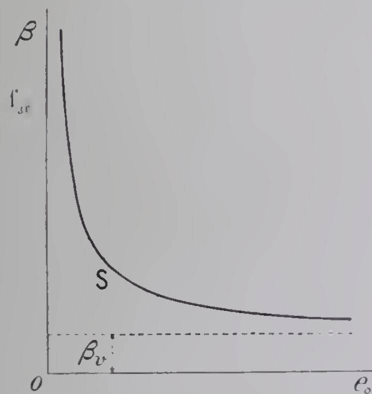
J'ai représenté graphiquement les épaisseurs e_0, avec les portées en abscisses, pour un grand nombre de voûtes, par intrados (pleins cintres, ellipses, arcs de divers surbaissements), en distinguant les ponts sous route des ponts sous rails.

Les graphiques montrent que les constructeurs ont choisi e_0, souvent suivant les matériaux et les hommes dont ils disposaient, d'après leur hardiesse, d'après l'aspect de l'ouvrage, souvent aussi par sentiment.

Art. 2. — Pour une voûte donnée, il y a une valeur de e_0 qu'on n'a pas intérêt à dépasser.

On pourrait croire que, pour une voûte d'ouverture, de montée, de surcharges données, la pression par centimètre carré diminue indéfiniment quand on augmente indéfiniment l'épaisseur : il n'en est rien.

C'est qu'en effet, la pression moyenne à la clef β est la somme de deux pressions : β_p dûe à la charge sur la voûte (tympans, remplissage, couronnement, surcharge) ; β_v dûe à la voûte seule, qui compte dans la charge totale toujours pour plus de 40 %, et jusqu'à 80 % dans les ponts-route très surbaissés.



β_v ne dépend pas de l'épaisseur à la clef [16].

β_p diminue quand e_0 augmente; admettons qu'elle est de la forme $\frac{k}{e_0}$

La pression moyenne totale est :

$$\beta = \beta_v \left(\begin{matrix}\text{indépendant} \\ \text{de } e_0\end{matrix}\right) + \frac{k}{e_0}$$

Il ne faut pas trop s'écarter du sommet S de cette hyperbole : à gauche, on augmente démesurément la pression ; à droite, on augmente l'épaisseur, sans réduire beaucoup la pression [17, 18].

46. — De même que, dans une colonne cylindrique non chargée, la pression par unité à la base est indépendante du diamètre.

47. — M. Tourtay, qui a fait cette remarque, donne cet exemple appliqué au pont Boucicaut (Tome III, p. 243) : $\beta = 10^k + \frac{10{,}85}{e_0}$

Epaisseur à la clef e_0	0m20	0m30	0m40	0m50	0m80	1m00	1m50	2m00	2m50	3m00
Pression moyenne β (Kg $_{0^m01^2}$)	64k2	46k2	37k1	31k7	23k6	20k8	17k2	15k4	14k3	13k3

En portant l'épaisseur de 1m à 1m50, on n'abaisse la pression moyenne que de 20k8 à 17k2, et on élève la poussée sur la culée (anneau de 1m de largeur) de 208T à 258T.

On a, très sagement, adopté 1m05.

Nouvelles Annales de la Construction, septembre, octobre et novembre 1902. — « *Méthode de calcul rapide des voûtes et de leurs culées* », par C. Tourtay, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées.

48. — Au pont d'Orléans (Tome III, p. 255), on a adopté e_0 = 1m25.

« *...Il n'y avait pas lieu de l'augmenter en vue de réduire la pression..., le gain... est... insignifiant* « *quand on passe de... 1m25 à... 1m40. Il y aurait eu, au contraire, avantage..., à abaisser l'épaisseur à* « *1m10 ou 1m15...* »

Génie Civil, 29 septembre 1906, p. 340 : « *Nouveau pont en maçonnerie sur la Loire, à Orléans* ».

Dans les petites et moyennes voûtes, le corps est en moellons ordinaires lités. Sur une ligne de chemin de fer, il y en a beaucoup, et on ne peut pas les suivre de près.

C'est dans ces voûtes-là qu'il faut être le moins hardi : un supplément d'épaisseur y coûte peu.

Les très grandes voûtes, elles, sont surveillées avec un soin particulier.

On n'y emploie que des matériaux de choix permettant les fortes pressions : ces matériaux coûtent cher.

Il importe d'y réduire à juste ce qu'il faut l'épaisseur e_o : on diminue ainsi, non seulement le cube de la voûte, mais son poids et sa poussée.

Art. 3. — Depuis le milieu du XVIIIe siècle, on réduit constamment le rapport $\dfrac{e_o \text{ (Épaisseur à la clef)}}{2\,a \text{ (Portée)}}$

A Lavaur (1771) [49], on avait pris 9 pieds pour 150 pieds, soit $e_o = 0{,}06\,(2\,a)$.

Au XVIIIe siècle, on a souvent pris $e_o = \dfrac{1}{24}(2\,a)$ [50] $= \dfrac{4{,}2}{100}(2\,a)$

$\dfrac{e_o}{2\,a}$ est descendu à 1/50 aux ponts de Chester [51] et de Luxembourg [52], à 1/60 au pont de Plauen [53].

Art. 4. — Quelques formules empiriques de e_o (Perronet, Dupuit, Croizette-Desnoyers).

On a attribué à Perronet la formule : $e_o = 0^m325 + 0{,}035\,(2\,a)$ [54]

Toute formule linéaire donne de trop fortes épaisseurs pour les grandes portées.

Dupuit exprima e_o en fonction, non plus de $2\,a$, mais de $\sqrt{2\,a}$; il proposa [55] :

pour les pleins cintres et les ellipses : $e_o = 0{,}20\,\sqrt{2\,a}$

pour les arcs (1/4 en moins !) : $e_o = 0{,}15\,\sqrt{2\,a}$

Ces formules ne tiennent compte que de la portée, non de la forme de l'intrados, ni des surcharges (route ou chemin de fer), ni du surbaissement.

Pour les très petites portées, e_o est trop petit : il faut dans les formules un terme constant.

49. — Tome I, p. 97.

50. — C'est ce que Perronet a admis à Neuilly (arche de 120 pieds au 1/4 : $e_o = \dfrac{120}{24} = 5$ p.).

51. — Tome III, p. 29. 52. — Tome II, p. 67. 53. — Tome III, p. 52.

54. — Il ne l'a pas ainsi énoncée, ni donnée comme de lui ; il a écrit : « *On est dans l'usage de leur* « *donner* (aux voussoirs de clef) *en longueur de coupe, pour les grandes arches qui sont surbaissées du* « *tiers, la vingt-quatrième partie de leur diamètre ;* *... »

* « *Il convient de donner aux voussoirs des clefs des petites arches, un pied de coupe de plus que ce vingt-quatrième, et la* « *diminuer ensuite à raison d'une ligne pour chaque pied d'ouverture des arches,... on peut donner un peu moins de longueur de* « *coupe... lorsque les voûtes sont en plein cintre.* »

« *Mémoire sur la réduction de l'épaisseur des Piles, et sur la courbure qu'il convient de donner aux Voûtes* », lu à l'Académie des Sciences, le 12 novembre 1777.

En anciennes mesures, ces indications seraient ainsi formulées :

Pour les grandes voûtes au 1/3 : $e_o \text{ (en pieds)} = \dfrac{2\,a}{24}$

Pour les petites : $e_o \text{ (en pieds)} = 1^p + \dfrac{2\,a}{24} - 1$ ligne par pied de portée $= 1^p + 2\,a \text{ (en pieds)} \left[\dfrac{1}{24} - \dfrac{1}{144}\right]$,

ou $e_o \text{ (en } m) = 0^m325 + 2\,a \text{ (en } m) \left[\dfrac{1}{24} - \dfrac{1}{144}\right]$ C'est cette formule que donne Sganzin dans son Cours de Construction, comme « *en usage dans les Ponts et Chaussées* », mais sans l'attribuer à Perronet.

Soit $e_o = 0^m325 + 0{,}034\,(2\,a)$. Léveillé l'écrit : $e_o = \dfrac{1}{3}\left[1 + \dfrac{2\,a}{10}\right]$ (*Note sur les ponts en maçonnerie*. Le Mans 1855, p. 5).

55. — « *Traité de l'équilibre des voûtes* », J. Dupuit, Paris, Dunod, 1870, p. 185.

Croizette-Desnoyers réalisa un très sensible progrès en exprimant ainsi e_0 :

$$e_0 = \alpha + \beta \sqrt{2r}$$ [56] (r rayon de l'arc de mêmes portée et montée)

Il distingua entre les ponts-route et les ponts de chemin de fer, mais non entre un arc et une ellipse de même surbaissement.

Art. 5. — Formule empirique proposée $e_0 = \alpha\left(1 + \sqrt{2a}\right)\mu$.

α est un coefficient numérique dont voici les valeurs :

Valeurs de α	Ponts sous route	Ponts sous chemin de fer à : voie normale	Ponts sous chemin de fer à : voie étroite	Valeurs de α
0,12	Limite inférieure			0,12
0,13				0,13
0,14			Limite inférieure	0,14
0,15	Bonne moyenne	Limite inférieure		0,15
0,16				0,16
0,17			Bonne moyenne	0,17
0,18	Limite supérieure	Bonnes moyennes		0,18
0,19		Bonnes moyennes		0,19
0,20			Limite supérieure	0,20
0,21		Limite supérieure		0,21

Si les matériaux sont excellents, on se tiendra au-dessous des « bonnes moyennes » ; si médiocres, au-dessus.

On est déjà timide aux limites supérieures, bientôt poltron au-delà.

On est déjà hardi aux limites inférieures, bientôt téméraire en-deçà.

Il est quelquefois permis d'être hardi, même très hardi : mais il faut savoir qu'on l'est.

Ces valeurs de α sont justifiées dans l'annexe à la fin de ce Tome.

μ, fonction du surbaisssement σ, est :

pour les pleins cintres : $\mu = 1$

pour les ellipses surbaissées : $\mu = \dfrac{4}{3 + 2\sigma}$

pour les arcs [57] $\mu = \dfrac{4}{3}(1 - \sigma + \sigma^2)$.

56. —

		Ponts - route	Ponts de chemin de fer
α		0,15	0,20
Pour $\sigma =$ 1/2 à 1/4	$\beta =$	0,15	0,17
1/6		0,14	0,16
1/8		0,13	0,15
1/10		0,12	0,14
1/12		0,11	0,13

Croizette-Desnoyers : « *Cours de Construction des Ponts* », Tome II, p. 10 et 21, Paris, Dunod, 1885.

57. — Aux arcs peu surbaissés, c'est-à-dire de surbaissement $\sigma \geqslant \dfrac{1}{2\sqrt{3}}$, soit φ (1/2 angle au centre) $\geqslant 60°$, il est d'usage de donner la même épaisseur à la clef qu'au plein cintre de même rayon r, c'est-à-dire $\alpha\left(1 + \sqrt{2r}\right)$.

Or, pour $\sigma \geqslant \dfrac{1}{2\sqrt{3}}$, les épaisseurs données par les deux formules :

$$e_0 = \alpha\left(1 + \sqrt{2r}\right) \qquad e_0 = \alpha\left(1 + \sqrt{2a}\right)\mu$$

ne diffèrent que de quelques millimètres.

Il est plus simple d'appliquer la même, quel que soit le surbaissement.

Si la voûte est en rouleaux superposés de briques, e_0 sera un multiple de la hauteur des briques.[58]

On trouvera, au Tome V, Appendice, des tables de :

$e_0 = \alpha\left(1 + \sqrt{2a}\right)$, pour $2a$ variant de 0^m60 à 100^m, et α de 0,10 à 0,25.

$\mu' = \frac{4}{3 + 2\sigma}$, pour σ variant de $\frac{1}{2}$ à $\frac{1}{6}$.

$\mu'' = \frac{4}{3}(1 - \sigma + \sigma^2)$, pour σ variant de $\frac{1}{2}$ à $\frac{1}{10}$.

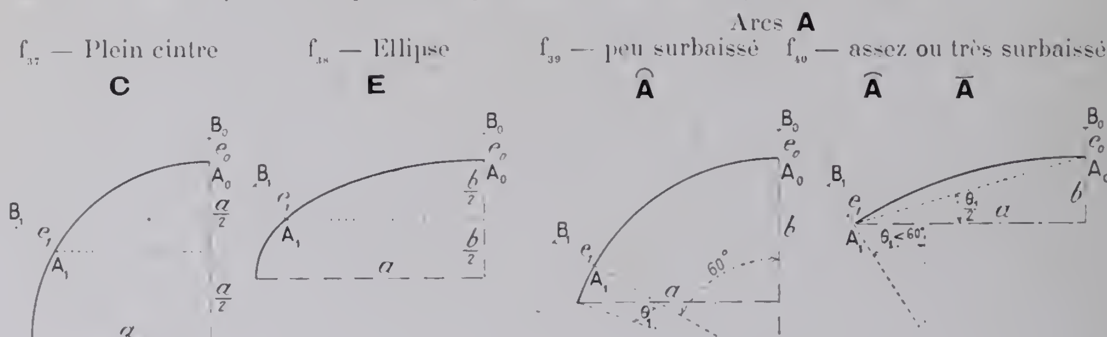
§ 2. — *ÉPAISSEUR AUX REINS* e_1

EXTRADOS CACHÉ PAR DES TYMPANS PLEINS

$$e_1 = \lambda\, e_0$$

Art. 1. — Formules empiriques proposées pour λ.

— On a l'épaisseur aux reins e_1 en multipliant l'épaisseur à la clef e_0 par un coefficient λ.



On peut sans risques admettre :

		Joint AB, sur lequel on prend l'épaisseur e_1	$\lambda = \frac{e_1}{e_0}$ [59]
Pleins cintres **C** (f_{37})		Milieu de la montée.	2 [59 bis]
Ellipses **E** (f_{38})		id.	$1 + 2\sigma$
Arcs **A**	peu surbaissés $\widehat{A}$ $\theta_1 \geqslant 60^\circ$ $\sigma \geqslant \frac{1}{2\sqrt{3}}$ (f_{39})	A 60° de la clef.	2
	assez ou très surbaissés $\widehat{A}, \overline{A}$ θ_1 [illegible] 60° σ [illegible] $\frac{1}{2\sqrt{3}}$ (f_{40})	Naissances	$1 + 12\sigma^2$

On trouvera au Tome V, Appendice, des tables de λ.

Art. 2. — Épaisseur e_1 définie par la condition que sa projection verticale soit e_0.

— La pression moyenne β_m sur un joint MM' (f_{11}) est :

$$\beta_m = \frac{H\left(\substack{\text{poussée} \\ \text{horizontale}}\right)}{e \cos \theta}$$

58. — Pont sur la Gimone (Ligne de Toulouse à Auch, 1875-76), anse de panier de 33^m au 1/3, 3 rouleaux de briques de 0^m42.

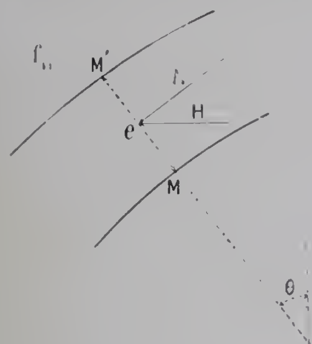
Pont de Saint-Waast (Ligne de Montauban à Castres, 1882-1884) pleins cintres de 20^m ; 3 rouleaux de briques de 0^m29.

59. — λ résulte moins nettement des voûtes faites que α dans la formule de e_0.

59 bis. — Toutefois, pour les tout petits pleins cintres ($2a$ [illegible] 8^m), la formule $e_1 = 2e_0$ donnerait des épaisseurs aux reins supérieures à celles des culées aux naissances.

J'indiquerai pour eux la règle à suivre, Tome V, Appendice.

β_m sera constante dans toute la voûte si $e \cos \theta$, projection verticale de e, l'est aussi[60].



$$e = \frac{e_0 \text{ (épaiss}^t \text{ à la clef)}}{\cos \theta} = e_0 \sqrt{1 + \operatorname{tang}^2 \theta} \quad [61]$$

Avec cette règle, on trouve, pour le joint $A_1 B_1$ défini à l'art. 1 :

Pleins cintres et arcs peu surbaissés : $e_1 = 2\, e_0$

C'est l'épaisseur usuelle.

Ellipses : $e_1 = e_0 \sqrt{1 + 12\, \sigma^2}$

Arcs assez ou très surbaissés : $e_1 = e_0 \dfrac{1 + 4\, \sigma^2}{1 - 4\, \sigma^2}$

C'est au-dessous des épaisseurs usuelles.

§ 3. — *CE QUE VALENT LES FORMULES EMPIRIQUES PROPOSÉES POUR* e_0, e_1

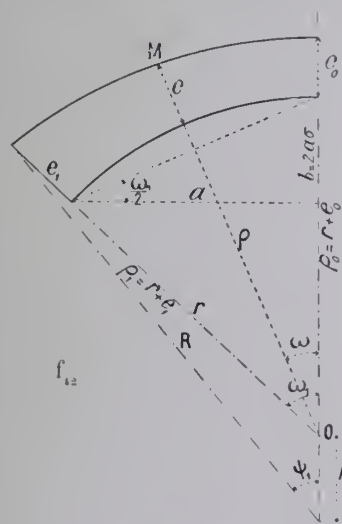
Avec ces formules, on reste dans les moyennes éprouvées : si on s'en écarte, on est prévenu.

Elles suffisent pour une voûte courante, pour le premier essai d'une voûte exceptionnelle.

§ 4. — *EXTRADOS DU CORPS DES VOÛTES*

Art. 1. — Règle. — On cherchera un extrados qui, avec l'intrados, encadre au mieux les courbes de pression : on le trouvera parmi les courbes d'intrados précédemment décrites[62].

On se borne le plus souvent à réunir par un arc de cercle les 2 points $B_0 B^1$ que définissent les épaisseurs e_0, e_1[63] (f_{37} à f_{40}, — p. 344).



60. — Cette remarque a été faite par Déjardin : « *Routine de l'Établissement des voûtes* », Paris, 1845, p. 36.

61. — Ceci est développé plus loin : Titre III, Chap. III.

62. — Tome III, p. 324 à 340.

63. — Supposons l'intrados en arc de cercle de rayon r. Soient (f_{12}) :

$$\rho_0 = r + e_0 \qquad \rho_1 = r + e_1$$

On trouve :

$$R \begin{pmatrix} \text{Rayon} \\ \text{de} \\ \text{l'extrados} \end{pmatrix} = \frac{\rho_0^2 + \rho_1^2 - 2\,\rho_0\,\rho_1 \cos \omega_1}{2\,(\rho_0 - \rho_1 \cos \omega_1)}$$

$$k = R - \rho_0 = \frac{\rho_1^2 - \rho_0^2}{2\,(\rho_0 - \rho_1 \cos \omega_1)} \qquad \sin \psi_1 = \frac{\rho_1}{R} \sin \omega_1$$

Équation de l'extrados en coordonnées polaires avec O comme pôle :

$$\rho = -k \cos \omega + \sqrt{R^2 - k^2 \sin^2 \omega}$$

Épaisseur e de la voûte en M : $e = \rho - r$

Équation de la ligne des milieux :

$$\rho_m = r + \frac{e}{2} = \frac{1}{2}\left[r - k \cos \omega + \sqrt{R^2 - k^2 \sin^2 \omega}\right]$$

Elle est très voisine du cercle passant par les milieux de la clef et des retombées.

Si l'intrados est en plein cintre ou en arc peu surbaissé, $\omega_1 = 60°$, $\cos \omega_1 = \dfrac{1}{2}$

$$R = \frac{(\rho_1 - \rho_0)^2 + \rho_0\,\rho_1}{2\,\rho_0 - \rho_1} \qquad k = \frac{(\rho_1 - \rho_0)\,(\rho_1 + \rho_0)}{2\,\rho_0 - \rho_1}$$

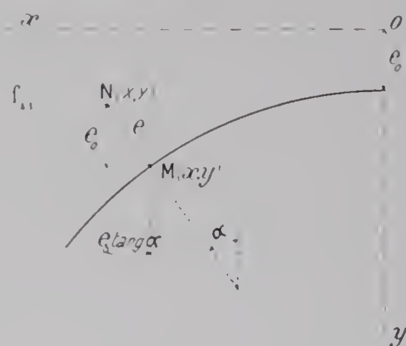
Si, de plus, $e_1 = 2\, e_0$:

$$\rho_1 = r + 2\,e_0 \qquad \rho_0 = r + e_0 \qquad \rho_1 - \rho_0 = e_0$$

$$R = r + \frac{3\,e_0}{r}\left(r + e_0\right) \qquad k = \frac{e_0}{r}\left[2\,r + 3\,e_0\right].$$

Art. 2. — Extrados d'une voûte dont l'épaisseur e en un point quelconque M a une projection verticale constante : $e = \frac{e_0}{\cos \alpha}$

1° *Ellipse.*



On a (f_{43}) :

$$\begin{cases} X = x + e_0 \operatorname{tang} \alpha = x + e_0 \dfrac{dy}{dx} \\ Y = y - e_0 \end{cases}$$

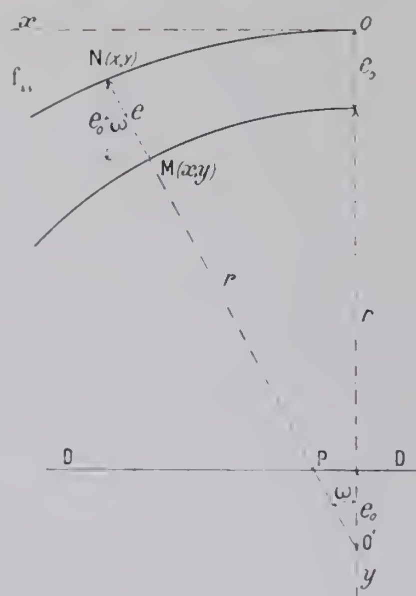
Avec :

$$y = e_0 + b \left(1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \right)$$

on trouve :

$$X = \frac{a^2 (b - Y) + b^2 e_0}{ab (b - Y)} \sqrt{Y (2 b - Y)} \quad {}^{64}$$

Cet extrados est horizontal à la clef. Il a quelque part un point d'inflexion : on s'assurera qu'il est au-dessous des naissances.



2° *Arc de cercle.* — Faisons, dans cette équation, $a = b = r$.

On trouve :

$$X = \frac{r - Y + e_0}{r - Y} \sqrt{Y (2 r - Y)}$$

En coordonnées polaires, on a de suite :

$$\rho = r + e = r + \frac{e_0}{\cos \omega} \quad {}^{65}$$

64. — Pour le milieu de la montee :

$$y = e_0 + \frac{b}{2} \qquad x = \frac{a \sqrt{3}}{2} \qquad \operatorname{tang} \alpha = \frac{b}{a} \sqrt{3} \qquad X = \sqrt{3} \left[\frac{a}{2} + e_0 \frac{b}{a} \right] \qquad Y = \frac{b}{2}$$

65. — Traçons une droite DD, à e_0 de O' (f_{44}).

$$O'P = \frac{e_0}{\cos \omega} \qquad PN = r$$

L'extrados est une conchoïde de Nicomède.

CHAPITRE IV

BANDEAUX

§ 1. — *SOUS TYMPANS PLEINS*

Art. 1. — Réduction des épaisseurs par rapport au corps de la voûte. — On réduit l'épaisseur du bandeau : par économie, parce que le bandeau est en matériaux chers ; pour l'aspect, l'œil n'admet pas aux reins les épaisseurs usuelles des voûtes.

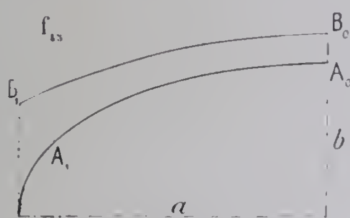
On cherchera une courbe qui s'ajuste bien à l'intrados parmi celles décrites plus haut [66].

Art. 2. — Pleins cintres. — Dans les viaducs [67], le bandeau est, presque toujours, extradossé parallèlement.

Dans de grands pleins cintres, on lui a conservé l'épaisseur du corps [68] : l'effet n'est pas heureux : il y a trop de différence entre la clef et les reins.

Art. 3. — Ellipses. — *A. - L'intrados est, aux naissances, tangent à deux piles, ou à deux culées, ou à une pile et une culée.*

On a souvent défini l'extrados par un arc de cercle unique B_0 B_1 (f_{43}).



Mais, à partir de la clef, le bandeau semble d'abord extradossé parallèlement, et même, bien que les joints aillent un peu en croissant, paraît, quelquefois, démaigri vers 20 à 30 % du développement à partir de la clef [69].

Aux reins, l'épaisseur croît démesurément, et exagère la hauteur des becs.

On cherchera une courbe qui fasse bon effet.

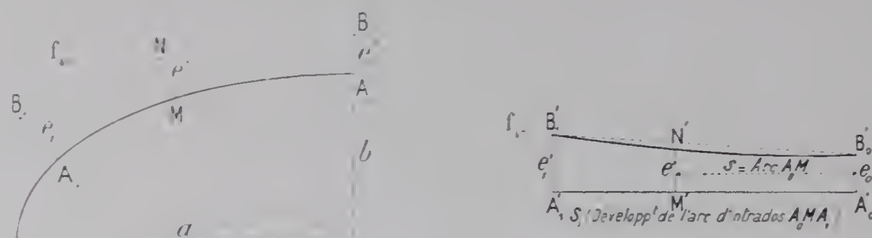
On peut, par exemple, faire croître l'épaisseur e' en fonction de la longueur de l'intrados à partir de la clef, depuis e'_0 épaisseur à la clef jusqu'à l'épaisseur e'_1 adoptée aux reins.

66. — Tome III, p. 324 à 340.

67. — Tome V, Appendice, Viaducs.

68. — Ponts de Collonges (Tome I, p. 31), d'Oloron (id., p. 45).

69. — Ponts de Bercy à Paris, de Port-Sainte-Marie sur la Garonne, (ligne de Condom à Port-Sainte-Marie).



Au pont de Marmande (f., f.) [70], nous avons adopté :

$$e' = e'_0 + (e'_1 - e'_0)\frac{s^2}{S_1^2}$$

Ce sont les ordonnées de la parabole B'₀ B'₁ (f.) : l'effet est bon.

Au pont de Valence [71] on a pris :

$$e'^2 = e'^2_0 + (e'^2_1 - e'^2_0)\frac{s^2}{S_1^2}$$

B'₀ B'₁ est un arc d'hyperbole [72].

Il faut être bien sûr que la courbe adoptée a une tangente horizontale à la clef [73].

B. - L'extrados est une demi-courbe complète [74]. — Quand, au lieu de s'arrêter à une pile ou à une culée, l'extrados est une demi-courbe complète, on l'étudiera de même en vue du meilleur effet.

Pour l'aspect, on fera croître l'épaisseur à partir de la clef.

Si, par économie, on doit accepter une épaisseur constante k, on extradossera, non suivant une ellipse $a + k$, $b + k$ [75], mais suivant une courbe parallèle à l'ellipse d'intrados [76].

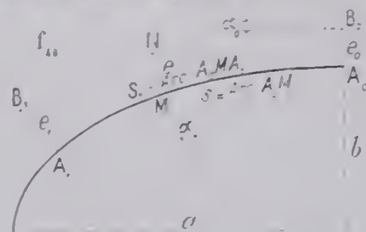
70. — $a = 18^m$; $b = 10^m$; $e'_0 = 1^m35$; $e'_1 = 2^m10$.

71. — Tome I, p. 173.

72. — Supposons e' calculée par cette formule (sur la fibre moyenne), et la fibre moyenne en arc de cycloïde.

On peut alors calculer assez simplement, par la méthode de M. Resal, les éléments de la courbe de pression.

(Note présentée à l'Académie des Sciences par M. Auric, Ingénieur des Ponts et Chaussées. Annales des Ponts et Chaussées, 4e trimestre 1905, p. 282).



73. — Par exemple, on n'acceptera pas la droite B' B'₁ (f.).

$$e' = e'_0 + (e'_1 - e'_0)\frac{s}{S_1}$$

Elle donne à la clef un angle rentrant (f., f.).

On trouve, en effet :

$$\tan \alpha_0 = \frac{(e'_1 - e'_0)\,a}{(a^2 + b e'_0)\,S_1}$$

74. — A tangentes verticales aux naissances. (Préliminaires, Tome III, p. 3).

75. — Les têtes des souterrains à une voie en anse de panier surhaussée, extradossées parallèlement, semblent maigres au tiers supérieur de la montée.

76. — Tome III, p. 329.

Art. 4. — Arcs. — On a souvent extradossé les bandeaux parallèlement, c'est-à-dire avec une épaisseur uniforme [77].

L'œil veut un peu d'accroissement, mais pas trop.

Au pont des Invalides (arcs de $31^{m}66$ au 1/10,2 et de $31^{m}19$ au 1/7,6), on a conservé pour le bandeau les épaisseurs du corps : $1^{m}20$ à la clef, $1^{m}70$ aux retombées : c'est trop aux reins.

Au pont de Saint-Loup sur l'Allier [78] (arcs de 33^{m} à 1/7,5), nous avons adopté $1^{m}15$, $1^{m}30$.

Dans les arcs très tendus, on ne gagne pas grand'chose à réduire le bandeau : on lui donne partout les mêmes épaisseurs qu'à la voûte [79].

On s'assurera que la courbe choisie pour l'extrados a une tangente horizontale à la clef [80].

On se gardera, par exemple, au-dessus d'un intrados en arc, de faire varier l'épaisseur proportionnellement à la distance angulaire au sommet [81] : mais on la pourra faire varier comme son carré [82].

§ 2. — *BANDEAUX SOUS TYMPANS TRAVERSÉS PAR DES ÉVIDEMENTS APPARENTS*

Art. 1. — Épaisseur. — Dans les ouvrages à tympans pleins, l'extrados du corps des voûtes est caché ; on y peut, sans dommage pour l'aspect, réduire le bandeau.

Mais, quand les tympans sont évidés par des arches transversales, l'extrados est vu comme l'intrados : le bandeau et le corps de la voûte ont partout la même épaisseur : on a quelquefois réduit par un chanfrein les bandeaux [83] : mais, de loin, c'est l'extrados de la voûte que l'on voit.

77. — Pont National à Paris (Portée : $34^{m}50$; montée : $4^{m}50$).

78. — Ligne de Gannat à La Ferté-Hauterive.

79. — Pont Boucicaut, Tome III, p. 243.

80. — Voir ce qui a été dit plus haut pour l'extrados des voûtes en ellipse (renvoi 73).

81. — On aurait alors (f_{49}) : $e' = e'_0 + (e'_1 - e'_0)\frac{\omega}{\omega_1}$

L'extrados est une spirale d'Archimède :

$$\rho = r + e'_0 + (e'_1 - e'_0)\frac{\omega}{\omega_1}$$

Et aussi la ligne des milieux : $\rho = r + \frac{e'}{2}$

$$\text{Tang } u = \omega + \frac{(r + e'_0)\,\omega_1}{e'_1 - e'_0}$$

Pour $\omega = 0$, u n'est pas 90°, la courbe n'est pas horizontale au sommet.

82. — On a alors : $\rho = r + e'_0 + (e'_1 - e'_0)\frac{\omega^2}{\omega_1^2}$ Tang $u = \frac{(r + e'_0)\,\omega_1^2}{2\,\omega\,(e'_1 - e'_0)} + \frac{\omega}{2}$

Pour $\omega = 0$ $u = 90°$

83. — Ponts sur la Moselle de Schweich, Trittenheim, Tome III, p. 268, p. 276.

Sous tympans évidés, on réduit les épaisseurs adoptées aux reins pour le corps des voûtes sous tympans pleins, pour deux motifs :

parce qu'aux reins la charge est réduite, la courbe de pression moins cambrée, l'effort moindre ;

pour l'aspect, parce que, comme on l'a dit plus haut pour les bandeaux, l'œil n'accepte pas une voûte trop épaisse aux reins [84].

Ainsi nous avons adopté pour λ au pont de Lavaur [85] : 1,70 au lieu de 2 ; au pont de Luxembourg [86] : 1,50 au lieu de 1,70.

On pourra, comme première approximation, prendre pour les pleins cintres et les arcs, $0{,}85\,\lambda$ (λ des formules pour tympans pleins données plus haut, p. 344).

Les voûtes en ellipse ont une grande épaisseur aux reins [87] et doivent être fort réduites. Au pont des Amidonniers [88], aux retombées des bandeaux amont du pont amont, une voussure réduit l'épaisseur à 74/100 (voûte de 46m), 77/100 (voûtes de 42m), 79/100 (voûtes de 38m50), de celle du corps.

Art. 2. — Courbe d'extrados.

— Comme dans le cas des tympans pleins, on cherchera une courbe qui s'ajuste bien à l'intrados, ait une tangente horizontale à la clef, et encadre au mieux les courbes de pression [89, 90].

84. — Reins trop épais aux ponts évidés de Brent, (Tome I, p. 34), de Céret, (Tome II, p. 160).

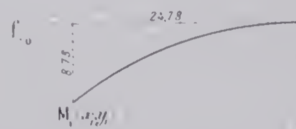
85. — Tome II, p. 135. 86. — Tome II, p. 67. 87. — Verdun-sur-le-Doubs (Tome I, p. 165).

88. — Tome I, p. 193. 89. — Pont de Luxembourg (Tome II, p. 68), $e = e_0 + hy^{0,6}$
e croît agréablement et la courbe est horizontale à la clef.

90. — Extrados du pont des Amidonniers, voûte de 46m (Tome I, p. 195).

On donnait un point des reins de l'extrados :

$x_1 = 24^{m}78 \qquad y_1 = 8^{m}78 \quad (f_{30})$



On a trouvé :

$y = 11{,}34728\ (1 - \sqrt[2]{1 - 0{,}001545\ x^2})$

$y = 19{,}245\ (1 - \sqrt[3]{1 - 0{,}001366\ x^2})$

$y = 27{,}294155\ (1 - \sqrt[4]{1 - 0{,}001283\ x^2})$

. . . .

$y = 51{,}7825\ (1 - \sqrt[7]{1 - 0{,}0011849\ x^2})$ *(adopté)*

L'indice du radical augmentant, les courbes sont de plus en plus au-dessous de l'ellipse.

L'arc de cercle est $y = 39{,}35858\ (1 - \sqrt[2]{1 - 0{,}0006455\ x^2})$.

TITRE II

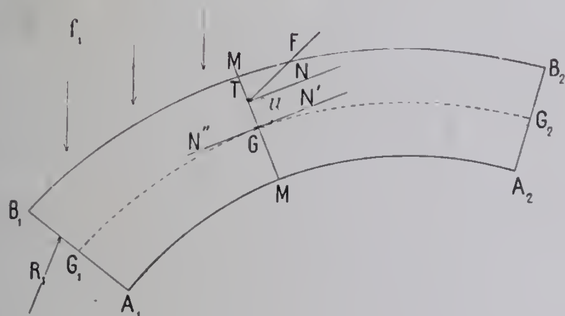
COMMENT ON CALCULE LES EFFORTS DANS LES GRANDES VOÛTES HYPOTHÈSE ÉLASTIQUE

CHAPITRE I

COMMENT ON DÉTERMINE POUR UNE SECTION QUELCONQUE L'EFFORT NORMAL ET LE COUPLE DE FLEXION

§ 1. — *COMPOSANTES DE L'EFFORT TOTAL SUR UNE SECTION COUPLE DE FLEXION*

Art. I. — Effort normal à la section N. — Effort tranchant T. — Couple de flexion N u (f_1).



Soient :

$A_1 B_1 A_2 B_2$ un arc ;

$G_1 G_2$ sa fibre moyenne, — lieu des centres de gravité des sections transversales, telles que M G M, faites par des plans également inclinés sur l'intrados et l'extrados ; — c'est, en pratique, le lieu des milieux des joints normaux à l'intrados.

On suppose l'arc symétrique par rapport au plan vertical de la fibre moyenne, et toutes les forces extérieures dans ce plan.

La partie d'arc à droite de la section M M exerce sur elle un effort F égal et directement opposé à la résultante des forces extérieures appliquées à gauche de M M.

F peut se décomposer en 2 forces :

N, normale à la section : c'est l'effort « normal »;

T, dans le plan de la section : c'est l'effort « tranchant ».

Dans les voûtes en maçonnerie, F est à peu près normal à la section : on convient de négliger T.

Je mène par le centre de gravité G deux forces égales à N et de sens contraires N', N''.

Tout se réduit :

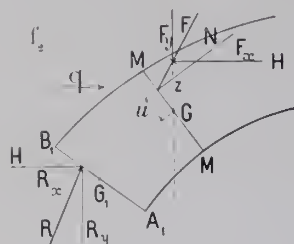
1° à l'effort normal N' = N appliqué en G ;

2° au couple de flexion N u, — égal au moment $\mathfrak{M}$ par rapport à G des forces extérieures à gauche de la section M M.

Art. 2. — Poussée horizontale H. — A la rencontre de F avec la verticale de G, décomposons F en forces verticale F_y et horizontale F_x (f_2).

S'il n'y a que des forces verticales à gauche de M M, F_x est égale à la composante horizontale R_x de la réaction de l'appui.

Elle est constante à toute hauteur : c'est la « poussée horizontale » de la voûte, H.



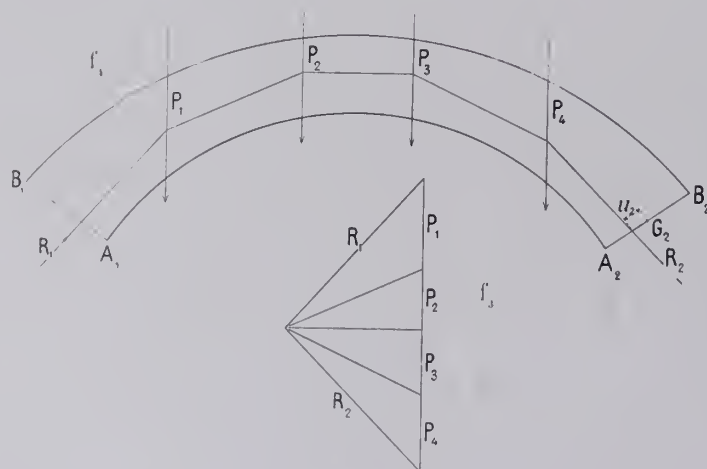
$$\mathfrak{M} = Nu = Hz$$

Si la voûte reçoit d'une voûte transversale d'élégissement une poussée q (f_2),

$$H = q + R_x$$

La poussée horizontale de la retombée est réduite de q.

§ 2. — *SI ON CONNAIT LA RÉACTION D'UN APPUI, ON PEUT, POUR CHAQUE SECTION, CALCULER OU CONSTRUIRE L'EFFORT NORMAL N ET SON BRAS DE LEVIER u.*



Supposons connue en grandeur et direction, la réaction de l'appui de droite R_2. Avec le polygone des forces (f_3), on a la réaction de l'autre appui R_1.

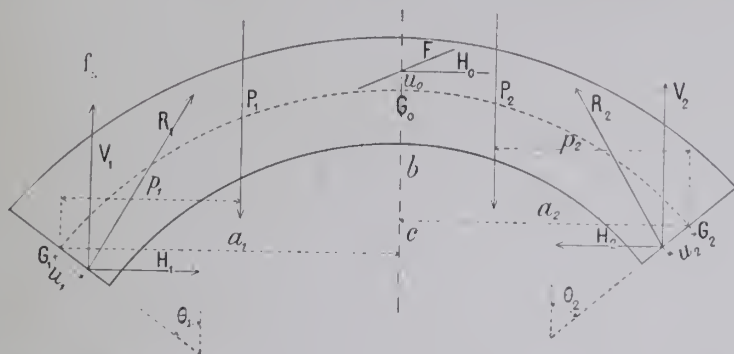
Si on a, de plus, le point d'application de R_2 (à u_2 de G_2), on peut construire le funiculaire (f_1), qui se ferme par R_1 et donne pour chaque section N et u, sur l'appui de gauche R_1 et u_1.

§ 3. — *COMMENT ON DÉTERMINE LA RÉACTION D'UN APPUI*

Art. 1. — La Statique ne donne que 3 équations pour 6 inconnues.

— Soit une voûte de fibre moyenne $G_1\,G_0\,G_2$ (f_5).

Pour simplifier, je la suppose soumise seulement à des forces verticales.



Soient :

R_1, R_2 les réactions de ses appuis, appliquées à u_1, u_2 des milieux $G_1 G_2$, positifs au-dessous de G_1 G_2 ;

V_1, H_1 ; V_2, H_2 leurs composantes verticales et horizontales ;

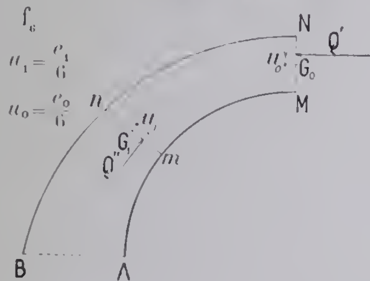
P_1, P_2 la résultante des forces verticales appliquées entre G_1 et G_0, entre G_0 et G_2.

Il y a 6 inconnues : V_1, H_1, u_1 ; V_2, H_2, u_2.

La Statique donne 3 équations d'équilibre [1] : il en manque trois. Si les voussoirs étaient indéformables, il faudrait se les donner arbitrairement [2].

Art. 2. — Hypothèses proposées pour avoir trois autres équations, en supposant les voussoirs indéformables.

A. - Hypothèse de Navier [3]. — « *Nous admettrons* (f_6) :



« *Que les deux voussoirs séparés par le joint* « *M N ne pressent point l'un contre l'autre par* « *l'arête inférieure M.*

« ....

« *Le point d'application de la résultante Q'* « *est aux 2/3 de la hauteur du joint, à compter de* « *l'extrémité inférieure M*......................

« ....

1. — $V_1 + V_2 = P_1 + P_2$ $\qquad H_1 = H_2$

(Moments autour de G_1) $V_1 u_1 \sin\theta_1 + H_1 u_1 \cos\theta_1 + V_2 [a_1 + a_2 - u_2 \sin\theta_2] + H_2 (c - u_2 \cos\theta_2) = P_1 p_1 + P_2 (a_1 + a_2 - p_2)$

2. — Pour une voûte articulée aux reins, en G_1, G_2, on a : $u_1 = 0$ $\qquad u_2 = 0$.
S'il y a une troisième articulation à la clef, on a : $u_0 = 0$.
Tout est défini.

3. — Navier. — *Résumé des leçons données à l'École royale des Ponts et Chaussées sur l'application de la mécanique à l'établissement des constructions et des machines.* — Première partie, p. 164 et suivantes, Paris, Firmin-Didot père et fils — MDCCCXXVI.

« En considérant maintenant le joint de rupture mn, *on admettra également « que la pression est nulle à l'arête supérieure* n, *où le joint tend à s'ouvrir, et « qu'elle augmente uniformément depuis cette arête jusqu'en* m, *où cette poussée « est à son maximum. »*

C'est supposer que la courbe de pression coupe la clef M N au 1/3 supérieur, le « joint de rupture » *mn* au 1/3 inférieur.

B. - Méthode de Méry[4]. — Au vrai, Méry n'a pas tiré des expériences de Boistard une méthode pratique : il n'a pas fixé de point de la courbe de pression, il a seulement indiqué comment on la construit, si on en connaît deux points.

La méthode connue sous son nom[5] consiste tout simplement à admettre les deux hypothèses enseignées bien avant par Navier, à savoir :

que la courbe de pression passe par M_0 (f_7), tiers supérieur de la clef A_0B_0 ; M, tiers inférieur d'un joint dit « de rupture », à déterminer aux reins ;

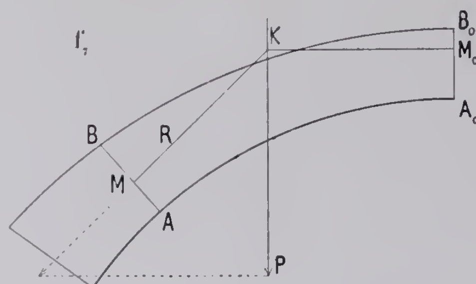
qu'en ces deux points elle est tangente aux bords du noyau central, et normale aux joints A_0B_0, A B (f_7).

Il eût été juste de l'appeler : méthode Navier-Méry.

Les deux hypothèses de Navier fournissent les 3 équations qui manquent :

$$u_1 = \frac{e_1}{6} \qquad u_2 = \frac{e_2}{6} \qquad u_0 = \frac{e_0}{6}$$

Pour les pleins cintres, les ellipses, les arcs peu surbaissés, on détermine ainsi le « joint de rupture »[6] :



Soient (f_7) : A B un joint quelconque, P la résultante des charges entre AB et la clef.

On mène par le 1/3 supérieur de la clef une horizontale M_0K, par K une perpendiculaire à AB.

Si $MA = \frac{1}{3} AB$, AB est le joint de rupture. On essaye un joint plus haut, si $MA < \frac{AB}{3}$[7], plus bas, si $MA > \frac{AB}{3}$.

4. — Annales des Ponts et Chaussées, 1840, 1er semestre, page 50, « *Sur l'équilibre des voûtes en berceau* », par M. E. Méry.

5. — Elle est exposée par Morandière : « *Traité de la Construction des Ponts et Viaducs* », p. 246. — Paris, Dunod, 1874.

6. — M. Résal : « *Emplacements, — Débouchés, — Fondations, — Ponts en maçonnerie,* » p. 188, Paris, Baudry et Cie, 1896.

7. — Morandière et Croizette-Desnoyers admettent comme angle du joint de rupture avec la verticale :

	Tympans pleins					Plein cintre à tympans élégis
	Plein cintre	Ellipse		Arc		
		au 1/3	au 1/4	au 1/5	à moins de 1/5	
Morandière..........	60°	45°	40°	naissances	naissances	»
Croizette-Desnoyers.	60°	45°	40°	43°		58° à 56°

Morandière : Loc. cit., renvoi 5, p. 208, Paris, Dunod, 1874.
Croizette-Desnoyers : « *Cours de Construction des Ponts* », p. 412 et 462, Paris, Dunod, 1885.

Pour les arcs assez et très surbaissés, on admet que le joint des naissances est le joint de rupture, bien que la résultante passant par le 1/3 ne lui soit pas normale.

La méthode, dite de Méry, a été appliquée à un très grand nombre de grandes voûtes qui ont tenu : elle est fort simple, très pratique, très suffisante pour les voûtes courantes[8].

Il est bon de toujours commencer par faire une épure Méry : elle donne fort approximativement la poussée, elle indique si et comment il faut modifier la courbe moyenne.

En Allemagne, on a souvent ainsi opéré :

On étale la surcharge sur toute la voûte ; on trace la courbe Méry, et une autre par les milieux de la clef et des retombées.

Puis on ne surcharge qu'une demi-voûte ; on trace une courbe de pression par le milieu de la clef, par le 1/3 inférieur de la retombée du côté chargé, par le 1/3 supérieur de la retombée du côté non chargé.

Si toutes ces courbes restent dans le noyau central, on suppose la voûte stable.

Art. 3. — Si les voussoirs sont élastiques (élastiques comme l'entend la Résistance des Matériaux), on leur peut appliquer les 3 équations « de déformation ».

A. - *La pierre est beaucoup plus déformable que l'acier.* — Soient :

E, le coefficient d'élasticité d'un « matériau »,

$$E\,(\text{en } {}^{kg}/_{1^{m^2}}) = \varepsilon \times \overline{10}^{9} \qquad \text{ou} \qquad E\,(\text{en } {}^{kg}/_{\overline{0^m01}^2}) = \varepsilon \times \overline{10}^{5}$$

ΔL, le raccourcissement évalué en microns (μ) d'un prisme de 1^m de long, sous une pression $\beta\,({}^{kg}/_{\overline{0^m01}^2})$

On a : $$\Delta L\,(\text{en } {}^{\mu}/_{\text{sur } 1^m}) = \frac{10\,\beta\,({}^{kg}/_{\overline{0^m01}^2})}{\varepsilon}$$

ε est, pour l'acier, 22 à 25 ; pour la maçonnerie de voûte, 0,3 à 3. [9]

A pression égale par $\overline{0^m01}^2$, les raccourcissements sont de 7 à 83 fois plus grands dans la maçonnerie que dans l'acier[10].

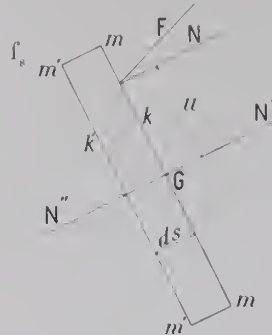
Il était donc fort naturel de calculer les grandes voûtes comme des arcs élastiques homogènes, c'est-à-dire avec les deux hypothèses que traduisent les formules dites de déformation de la Résistance des Matériaux : je suis, pour être clair, forcé de les rappeler.

B. — *Hypothèses de la Résistance des Matériaux.*

B_1 - Hypothèse de Hooke[11]. — *Tant que l'effort par unité reste au-dessous*

8. — Pour les petites voûtes, on adopte, sans épure, des épaisseurs justifiées par une longue pratique.
9. — Voir plus loin, Titre III, chap. IV, § 1 et 2.
10. — L'acier travaillant à 1.000^k, une pierre de $\varepsilon = 1$ travaillant à 40^k, ont la même déformation.
11. — « *ut tensio sic vis* », — Robert Hooke (1635-1703) : « *De Potentiâ restitutivâ* », — Londres, 1678.

d'une limite, dite d'élasticité, l'allongement ou le raccourcissement est proportionnel à l'effort, c'est-à-dire que, pour un même corps, le rapport de l'effort à la déformation, dit « coefficient d'élasticité », est constant[12].



B_2 - Hypothèse de Navier. — Une section transversale reste plane après flexion.

Soit (f_8) une tranche d'épaisseur ds, symétrique par rapport au plan vertical contenant les forces extérieures, pressée par une force normale N, à u de son centre de gravité G.

Soient :

Ω la surface de la section $m\,m$;

I son moment d'inertie par rapport à un axe perpendiculaire au plan de la figure en G ;

E le « coefficient d'élasticité » dans le sens de la fibre moyenne.

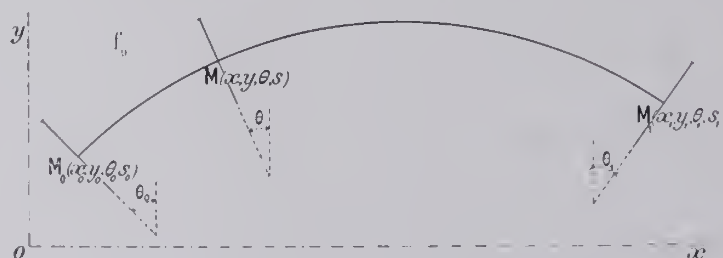
Je mène par G deux forces parallèles N', N'', égales à N et de sens contraires.

N' comprime uniformément la tranche de $\dfrac{N\,ds}{E\,\Omega}$ (Hooke).

Le couple $N\,u$ fait tourner la face $m\,m$ par rapport à $m'\,m'$ d'un angle $d\,\theta$.

En supposant que chaque fibre, telle que $k\,k'$ « *se comporte comme une tige isolée et qu'elle n'est pas influencée par les fibres voisines,* »[13] que, par conséquent, on peut lui appliquer l'hypothèse de Hooke, — que toute la section reste plane après flexion (Navier), qu'ainsi, non seulement la partie comprimée et la partie tendue sont chacune restées planes après déformation, mais aussi la section entière, c'est-à-dire que les coefficients d'élasticité à la tension et à la compression sont égaux, on trouve : $d\,\theta = \dfrac{N\,u\;ds}{E\,I}$.

C. - Équations de déformation. — Soient (f_9) :



M_0 (x_0, y_0, θ_0),
M_1 (x_1, y_1, θ_1), un arc de la fibre moyenne avant déformation ;

M (x, y, θ), un point de l'arc ;

α, le coefficient de dilatation linéaire.

12. — $E = \dfrac{\xi\ (\text{kg } 1^{mq})}{\dfrac{dL}{L}} \begin{pmatrix}\text{en mêmes}\\ \text{unités}\end{pmatrix} = \dfrac{\text{effort par unité de surface}}{\text{allongement par unité de longueur}}$.

13. — Bresse, « *Résistance des Matériaux* », p. 33, Paris, 1866.

Supposons appliqués :

1° au G de chaque section transversale, un effort normal N ;

2° autour de G de chaque section, un couple $\mathfrak{M} = N u$.

(N et u variables d'une section à l'autre).

Supposons enfin que la température de l'air change de $t°$.

Les déplacements de M_0 (Δx_0, Δy_0, $\Delta \theta_0$) étant supposés connus, ceux de M_1 (Δx_1, Δy_1, $\Delta \theta_1$) sont donnés par ces trois formules dites de déformation [14] :

$$\Delta \theta_1 = \Delta \theta_0 + \int_{s_0}^{s_1} \frac{\mathfrak{M}\, ds}{E I}$$

$$\Delta x_1 = \Delta x_0 - \Delta \theta_0 (y_1 - y_0) - \int_{s_0}^{s_1} \frac{\mathfrak{M}\,(y_1 - y)\, ds}{E I} + \int_{x_0}^{x_1} \frac{N\, dx}{E\, \Omega} + \alpha\, t\, (x_1 - x_0)$$

$$\Delta y_1 = \Delta y_0 + \Delta \theta_0 (x_1 - x_0) + \int_{s_0}^{s_1} \frac{\mathfrak{M}\,(x_1 - x)\, ds}{E I} + \int_{y_0}^{y_1} \frac{N\, dy}{E\, \Omega} + \alpha\, t\, (y_1 - y_0)$$

Si l'arc est inarticulé, ou, — comme on le dit souvent, — « encastré » aux naissances, les points M_0, M_1, les sections M_0, M_1 sont immobiles :

Δx_0, Δy_0, $\Delta \theta_0$ $\quad$ Δx_1, Δy_1, $\Delta \theta_1$ $\quad$ sont nuls.

La première équation se réduit à :

$$\int_{s_0}^{s_1} \frac{\mathfrak{M}\, ds}{E I} = 0$$

Elle exprime que la somme des rotations de chaque section par rapport à la précédente est nulle entre les retombées.

Les deux autres deviennent :

$$\int_{s_0}^{s_1} \frac{\mathfrak{M}\, y\, ds}{E I} + \int_{x_0}^{x_1} \frac{N\, dx}{E\, \Omega} + \alpha\, t\, (x_1 - x_0) = 0$$

$$-\int_{s_0}^{s_1} \frac{\mathfrak{M}\, x\, ds}{E I} + \int_{y_0}^{y_1} \frac{N\, dy}{E\, \Omega} + \alpha\, t\, (y_1 - y_0) = 0$$

$\mathfrak{M}$, N, s'expriment en fonction des forces extérieures autres que la réaction de l'appui M_0, lesquelles sont connues, et en fonction de cette réaction inconnue.

14. — Bresse. — « *Cours de Mécanique appliquée* », 2e édition, 1re Partie, Paris. Gauthier-Villars, 1866, p. 90 et suivantes.

M. Résal. — *Résistance des Matériaux*. — Paris, Baudry, 1898, p. 247 et suivantes.

M. Résal a, le premier en France, enseigné à calculer des voûtes par les formules de déformation [15, 16].

D. - Les équations de déformation ne tiennent pas compte de la rigidité des tympans. — Elles supposent que l'arc se déforme librement, que les charges lui sont transmises comme par des tiges verticales isolées.

Il n'en est point ainsi : les tympans, les plinthes sont rigides et soulagent l'arc [17].

On l'a observé aux viaducs de la ligne d'Issy à Viroflay [18], aux ponts de Lavaur [19] et Antoinette [20].

Art. 4. — En pratique, graphiquer au lieu de calculer.

Le calcul est laborieux, rebutant : on y peut, sans s'en apercevoir de quelque temps, commettre de grosses erreurs.

Le graphique fatigue moins ; il se prête mieux à toutes les combinaisons de surcharges ; avec lui, on voit.

Tous deux viennent d'hypothèses inexactes : la précision du calcul y est fort inutile ; celle du graphique suffit ; il n'y a vraiment pas à s'inquiéter des décimales quand les entiers sont suspects.

A l'Appendice, Tome V, je donnerai tout ce qu'il faut pour faire une épure de voûte, et ce qui résulte d'un grand nombre d'épures.

15. — MM. Degrand et Résal : « *Ponts en maçonnerie* », Tome premier : « *Stabilité des voûtes* », p. 103 et suivantes, — Paris, Baudry et Cie, 1887.

M. Résal : « *Emplacements, débouchés. Fondations des Ponts en maçonnerie* », p. 191 et suivantes, — Paris, Baudry, 1896.

M. Résal : « *Stabilité des Constructions* », p. 367 et suivantes, — 564 et suivantes, — Paris, Béranger, 1901.

Voir aussi :

M. Pigeaud : Annales des Ponts et Chaussées, 1905, 2e trimestre, p. 202 : « *Calcul des arcs encastrés* ».

M. Auric : « *Ponts en maçonnerie : Calcul et Construction* », p. 250 et suivantes. — Paris, Octave Doin et fils, 1911.

16. — Je me permets de rappeler ici une indication donnée en 1886 :

« *Avec des modules de résistance moindres et un coefficient d'élasticité bien plus voisin de celui de* « *rupture, une voûte à ciment se comporte comme un arc en fonte encastré aux naissances ; on lui doit* « *donc appliquer, non plus les hypothèses surannées basées sur les expériences de Boistard, mais les* « *formules de la Résistance des Matériaux, contrôlées par la mesure directe, faite avec des instruments* « *assez précis, des mouvements au décintrement, sous l'action des charges et de la température, du* « *coefficient d'élasticité...* »

Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1886, p. 427 : « *Construction des Ponts du Castelet, de Lavaur et Antoinette* ».

Ce contrôle des formules de déformation, on l'attend encore.

17. — C'est ainsi que les longerons et le tablier d'un ouvrage en métal, en béton armé, solidarisent ses pièces de pont, reportent sur ses voisines une partie de ce qui en charge une. Génie Civil, 24 août 1912 : « *Etude sur la solidarité des pièces de pont* », M. Lossier.

18. — Revue Générale des Chemins de fer, juillet 1902, p. 9 : « *Notes sur les travaux de la ligne d'Issy à Viroflay* », M. Rabut

19. — Tome II, p. 143 20. — Tome II, p. 149.

CHAPITRE II

ON CONNAIT L'EFFORT TOTAL *N* SUR UNE SECTION, SA DISTANCE *u* AU CENTRE DE GRAVITÉ. COMMENT *N* SE DISTRIBUE-T-IL SUR LA SECTION ? EFFORTS PAR UNITÉ EN CHAQUE POINT

§ 1. — *FORMULES*

Menons par le centre de gravité G, deux forces N', N'' égales à N et de sens contraires (f_{10}).

L'effort normal N' produit une pression uniforme $\frac{N}{\Omega}$.

Le couple de flexion Nu produit en un point K à z de G un effort : $\frac{N u z}{I}$.

L'effort total par unité à z de G est donc :

$$\beta_z = \frac{N}{\Omega} + \frac{N u z}{I} = \frac{N}{\Omega}\left[1 + \frac{u z \Omega}{I}\right] \quad ^{21}$$

Soit, pour une section rectangulaire de hauteur e et de 1^m de largeur [22] :

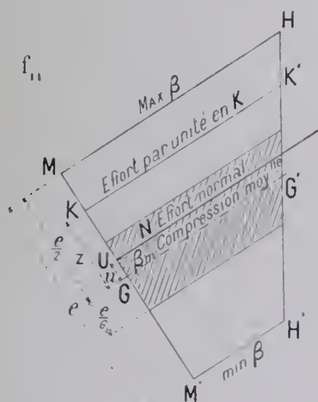
$$\beta = \frac{N}{e}\left[1 + \frac{12\, u z}{e^2}\right].$$

L'effort par unité est maximum à l'extrémité M du même côté que N par rapport à G $\left(z = \frac{e}{2}\right)$, minimum à l'autre $\left(z = -\frac{e}{2}\right)$

$$\begin{cases} \text{Max } \beta \text{ (en M)} = \frac{N}{e}\left[1 + \frac{6u}{e}\right] \\ \text{Min } \beta \text{ (en M')} = \frac{N}{e}\left[1 - \frac{6u}{e}\right] \end{cases}$$

§ 2. — *REPRÉSENTATION GRAPHIQUE*

Art. I. — Le centre de pression U est dans le noyau central : $u < \frac{e}{6}$. — (*Règle du trapèze*).



Soient (f_{11}) : M H = Max β; M' H' = min β.

Considérons le trapèze M H M' H'.

K K' est l'effort par unité en K, à z de G.

L'effort par unité en G, G G' est la pression moyenne : $\beta_m = \frac{N}{e} = \frac{\text{Max}\,\beta + \min \beta}{2}$.

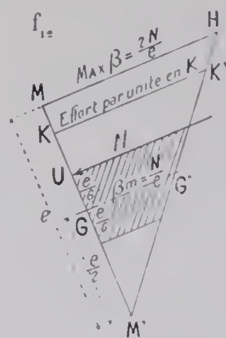
L'effort normal N fait équilibre à toutes les forces élémentaires développées sur M M' : il passe donc par le centre de gravité du trapèze et est égal à sa surface.

Si N passe par G, $u = 0$: le trapèze devient un rectangle de surface N ; sur M M', la pression est partout $\frac{N}{e}$.

21. — N en kilogs, les longueurs en m. — Alors β en $^{kg}/_{m^2}$. 22. — $\Omega = e$ $I = \frac{1}{12} e^3$ (e en m).

Art. 2. — Le centre de pression U est à la limite du noyau central : $u = \frac{e}{6}$ (f_{12}).

$$M\,H = \text{Max}\,\beta = \frac{2\,N}{e} = 2\,\beta_m \qquad \text{Min}\,\beta = 0.$$



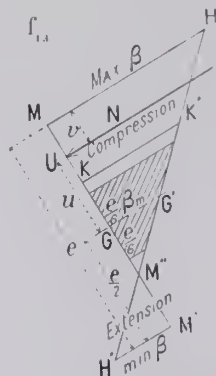
Le trapèze M H M' H' de f_{11} est devenu le triangle M H M' de f_{12}.

K K' est l'effort par unité en K.

L'effort normal N passe par le centre de gravité du triangle et est égal à sa surface.

Art. 3. — Le centre de pression U est hors du noyau central $u > \frac{e}{6}$.

A. - Si la maçonnerie pouvait travailler à la tension.



Soient (f_{13}) :

$$M\,H = \text{Max}\,\beta \qquad M'\,H' = \min\beta \quad \text{(ici négatif)}$$

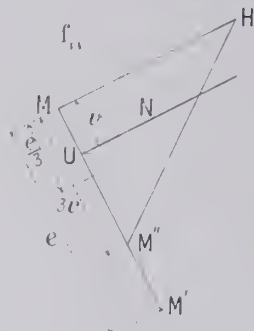
$$M\,M'' = M\,M'\,\frac{M\,H}{M\,H + M'\,H'} = \frac{1}{2}\left[e + 6\,u\right]$$

$$\text{Soit } v = \frac{e}{2} - u, \qquad M\,M'' = 2\,e - 3\,v.$$

K K' est l'effort par unité en K. C'est une compression du même côté que N par rapport à M'', — une tension du côté opposé.

N est la différence des surfaces M H M'', M'' H' M'.

B. - Si la maçonnerie ne peut pas travailler à la tension (Règle du triangle). — En pratique, on convient de ne pas tenir compte de la partie tendue, mais seulement de la partie comprimée, limitée à $3\,v$ (f_{14}).



Alors, M H (comme dans le 2e cas) $= \frac{2\,N}{3\,v}$ (2 fois l'effort sur 3 fois la bande comprimée).

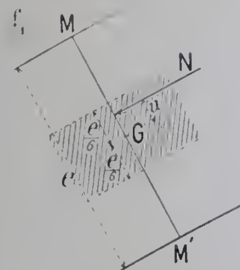
TITRE III

RELATION ENTRE LES CHARGES ET LA FORME DE LA VOÛTE

CHAPITRE I

ON DOIT TRACER LA FIBRE MOYENNE DE FAÇON QUE LES COURBES DE PRESSION S'EN ÉCARTENT LE MOINS POSSIBLE

En tous les points d'un ouvrage, la maçonnerie devrait travailler à son effort maximum.



On vient de rappeler que, quand une section M M' (f_1) est soumise à un effort normal N, la pression maxima par unité β s'exerce en M, et est, pour $u \leqslant \frac{e}{6}$:

$$\text{Max}\ \beta = \beta_m \Big\} = \underset{\text{moyenne}}{\text{pression}}\ \frac{N}{e} \Big\{ \left(1 + \frac{6u}{e}\right)$$

Pour rapprocher Max β de β_m, il faut diminuer u, c'est-à-dire adopter une fibre moyenne telle que la courbe de pression la plus éloignée s'en écarte peu.

On s'est souvent borné à vérifier que les funiculaires des charges coupant la clef et les retombées en des points convenus, milieu ou tiers, ne sortaient pas du noyau central.

Mieux : on a tracé par les milieux de la clef et des retombées le funiculaire des poids morts, soit seuls, — soit en y ajoutant ou la moitié de la surcharge ou toute, — et pris ce funiculaire comme nouvelle fibre moyenne.

Pour les très grandes voûtes, les très surbaissées, on doit construire toutes les courbes de pression, puis modifier le tracé de la voûte, pour les rapprocher de la fibre moyenne.

CHAPITRE II

CAS D'UNE VOÛTE INFINIMENT MINCE

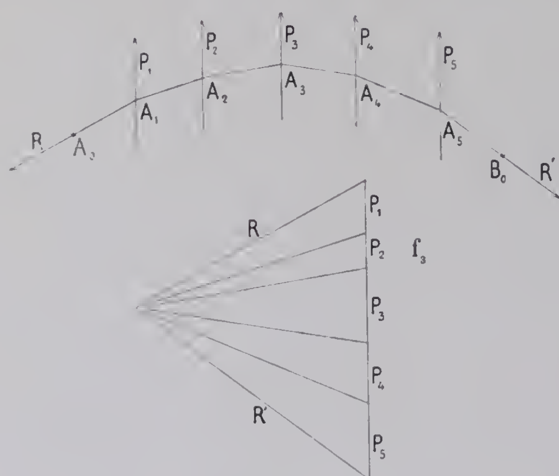
RELATION ENTRE :

D'UNE PART, LA FORME D'UNE VOÛTE INFINIMENT MINCE, INCOMPRESSIBLE, DONT CHAQUE ÉLÉMENT S'ORIENTE SUIVANT LA RÉSULTANTE DES FORCES QUI LUI SONT APPLIQUÉES [1], C'EST-A-DIRE UNE COURBE FUNICULAIRE DES CHARGES ;

D'AUTRE PART, UNE LIGNE LIMITANT LES CHARGES VERTICALES COMPTÉES A PARTIR DE LA VOÛTE, DITE LIGNE DE CHARGE.

§ 1. — *PRÉLIMINAIRES*

Art. 1. — Rappel de la notion des courbes funiculaires. — Considérons (f_3) un fil, sans poids, flexible, inextensible, attaché en deux points A_0 et B_0, soumis à des forces verticales, mais agissant de bas en haut, P_1, P_2,... Il prendra la forme d'un polygone dont chaque côté s'oriente suivant la résultante des actions d'un même côté, forces P_1, P_2,... et réaction de l'attache ; c'est le polygone funiculaire des forces P_1, P_2,...

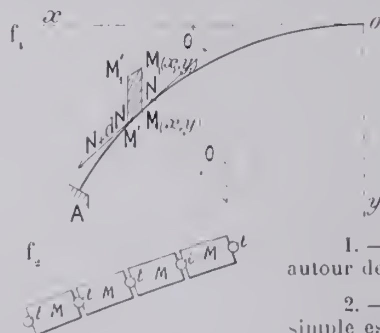


Si les forces se rapprochent, ses côtés diminuent, chacun d'eux demeurant orienté suivant la résultante des forces qui agissent sur lui, laquelle est ici une tension : les tensions des attaches sont égales et opposées à l'effort des côtés extrêmes.

Supposons maintenant que les forces verticales soient des poids, agissant de haut en bas ; que le fil soit incompressible au lieu d'être inextensible.

On aura le même polygone des forces, le même funiculaire ; chaque élément restera orienté suivant la résultante des forces situées d'un même côté ; mais cette résultante, les réactions des appuis, sont alors des compressions [2].

Art. 2. — Définition de la ligne de charge. — Soit O le sommet d'une voûte AO infiniment mince (f_4).



En un point quelconque M (x, y), élevons une verticale sur laquelle $M M_1$ représentera, en hauteur de maçonnerie de même densité γ que celle de la voûte, la charge en M.

Le lieu de M_1 (x_1, y_1) est la *ligne de charge*.

1. — Par exemple une chaîne d'acier faite de maillons pleins M, mobiles autour de tourillons t (f_2).

2. — Pour se représenter de suite la forme de la fibre moyenne, le plus simple est de continuer à supposer le fil flexible et les forces de bas en haut.

Art. 3. — Relation entre la fibre moyenne *(courbe funiculaire)* et la ligne de charge.

— M M' (f_1) est en équilibre sous l'action de : N à droite de M M_1, N + dN à gauche de M' M'_1, $\gamma (y - y_1)\, dx$, poids de la tranche de maçonnerie M M_1 M'_1 M'.

Écrivons que :

la variation de la projection horizontale est nulle :

$$d\,(N \cos \theta) = 0 \qquad \text{ou } N \cos \theta = \text{Constante} = H \text{ (poussée horizontale) ;}$$

la variation de la projection verticale est $\gamma (y - y_1)\, dx$:

$$d\,(N \sin \theta) = d\left[\frac{H}{\cos \theta} \sin \theta\right] = d\,(H \operatorname{Tang} \theta) = H d\left(\frac{dy}{dx}\right) = \gamma\,(y - y_1)\, dx$$

$$H \frac{d^2 y}{dx^2} = \gamma\,(y - y_1)$$

Si on se donne la fibre moyenne y, la ligne de charge est :

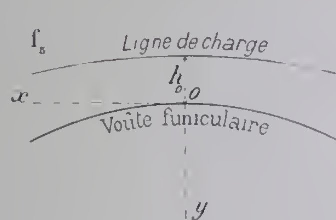
$$y_1 = y - \frac{H}{\gamma} \frac{d^2 y}{dx^2}$$

On l'a par une simple dérivation.

Si on se donne la ligne de charge y_1, il faut, pour avoir la fibre moyenne y, intégrer une équation différentielle, ce qui n'est pas souvent possible.

Art. 4. — Poussée horizontale H dans une voûte funiculaire infiniment mince :

$$H \text{ (en kg.)} = \gamma \begin{pmatrix}\text{poids du m. c.}\\ \text{de maçonnerie,}\\ \text{en kg.}\end{pmatrix} \times h_0 \begin{pmatrix}\text{charge à la clef}\\ \text{en hauteur de ma-}\\ \text{çonnerie, en } m.\end{pmatrix} \times \rho_0 \begin{pmatrix}\text{rayon de courbure}\\ \text{de la voûte}\\ \text{à la clef, en } m.\end{pmatrix}$$



Pour la clef (f_0) :

$$y = 0 \qquad \frac{dy}{dx} = 0 \qquad \rho_0 = \frac{1}{\left(\frac{d^2 y}{dx^2}\right)_0} \qquad y_1 = -h_0$$

$$H = \gamma\, h_0\, \rho_0$$

H est le produit du poids sur la clef $\gamma\, h_0$ par le rayon de courbure à la clef [3].

3. — On a proposé des formules empiriques de e_0 en fonction de ρ_0.

Celle-ci : $e_0 = \frac{1}{3}(1 + 0.2\,\rho_0)$ est attribuée à Saint-Guilhem par Déjardin *(Routine de l'établissement des voûtes)*.

Dans la monographie du pont sur la Big-Muddy River (Tome I, p. 225, renvoi 2), j'ai cité celles de M. J. M. Rankine :

$e_0 = 0{,}227\,\sqrt{\rho_0}$ (ponts à plusieurs arches) $\qquad$ $e_0 = 0{,}191\,\sqrt{\rho_0}$ (ponts à une arche)

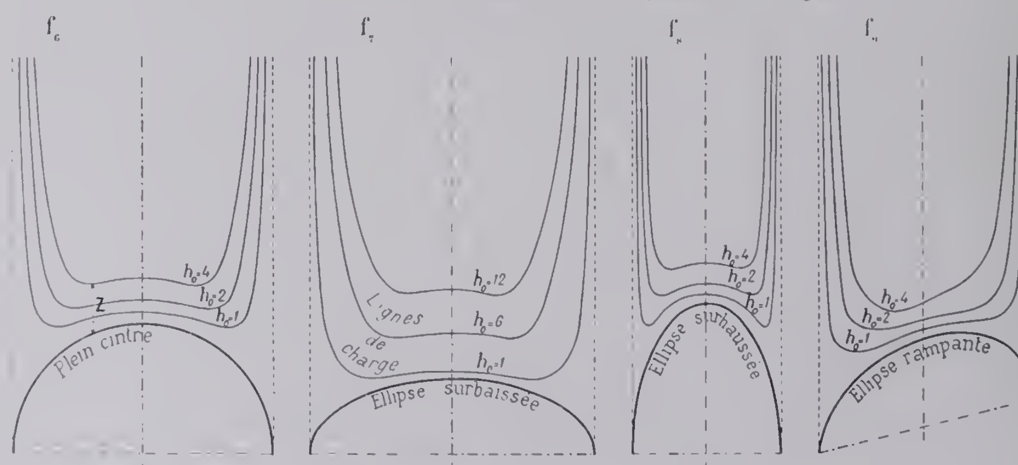
§ 2. — *DE LA FIBRE MOYENNE, DÉDUIRE LA LIGNE DE CHARGE, C'EST-A-DIRE : COMMENT FAUT-IL CHARGER UNE VOÛTE POUR QU'ELLE SOIT UNE COURBE FUNICULAIRE DES CHARGES ?*

Art. I. — Plein cintre. Ellipse.

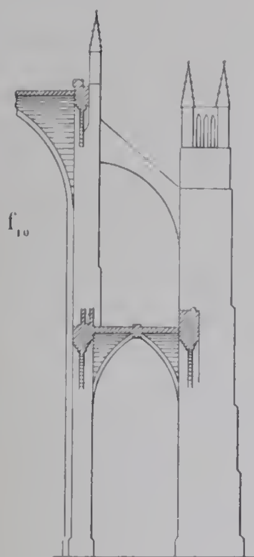
	Plein cintre (r)	Ellipse (a, b)
Fibre moyenne $y =$	$r\left(1-\sqrt{1-\frac{x^2}{r^2}}\right)$	$b\left(1-\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}}\right)$
Poussée horizontale $H = \gamma h_o\, \rho_0 =$	$\gamma\, h_0\, r$	$\gamma\, h_0\, \frac{a^2}{b}$
Charge comptée à partir de la voûte (distance verticale entre la fibre moyenne y et la ligne de charge y_1) : $Z = y - y_1 = \frac{H}{\gamma}\frac{d^2y}{dx^2} = h_0\rho_0\frac{d^2y}{dx^2} =$	$\frac{h_0}{\left(1-\frac{x^2}{r^2}\right)^{\frac{3}{2}}}$	$\frac{h_0}{\left(1-\frac{x^2}{a^2}\right)^{\frac{3}{2}}}$
Charge sur les naissances	∞	∞
	(Les verticales des appuis sont les asymptotes de y_1).	

Voici (f_6 à f_9) quelques lignes de charge :

Voûtes infiniment minces et leurs lignes de charge.



Au lieu du plein cintre entier de f_6, n'en considérons qu'une moitié : la ligne de charge aura toujours une asymptote verticale à la naissance.

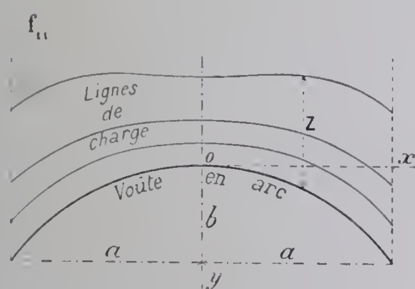

f_{10}

Supposons que l'arc soit la fibre moyenne d'un arc boutant poussé par une voûte d'arête (f_{10}). La ligne de charge s'inscrira fort exactement dans l'arc boutant et son contrefort, si utilement lesté d'un pinacle.

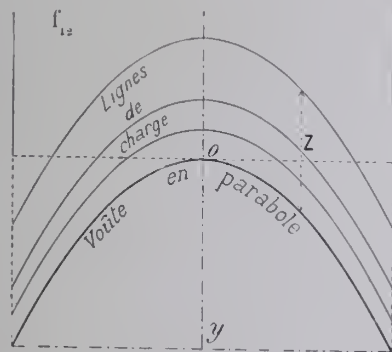
Les Architectes de nos vieilles cathédrales sentaient l'équilibre des voûtes.

Art. 2. — Arc de cercle. Arc d'ellipse (f_{11}).

— Arrêtons aux verticales des retombées ce qu'on vient de trouver pour le plein cintre et l'ellipse.



	Arcs de portée $2a$ de montée b — Arc de cercle (rayon r)	Arc d'ellipse ($\frac{1}{2}$ axes : a' b')
Voûte $y =$	$r\left(1-\sqrt{1-\frac{x^2}{r^2}}\right)$	$b'\left(1-\sqrt{1-\frac{x^2}{a'^2}}\right)$
Charge sur la voûte : $Z = y - y_1 =$	$\dfrac{h_0}{\left(1-\frac{x^2}{r^2}\right)^{\frac{3}{2}}}$	$\dfrac{h_0}{\left(1-\frac{x^2}{a'^2}\right)^{\frac{3}{2}}}$
Charge aux retombées	$\dfrac{h_0}{\left(1-\frac{a^2}{r^2}\right)^{\frac{3}{2}}}$	$\dfrac{h_0}{\left(1-\frac{a^2}{a'^2}\right)^{\frac{3}{2}}}$



Art. 3. — Parabole (f_{12}).

— A la funiculaire $y = p\,x^2$, de poussée $H = \gamma\, h_0 \rho_0 = \dfrac{\gamma\, h_0}{2p}$, correspond la ligne de charge :

$$y_1 = p\,x^2 - \frac{2\,H\,p}{\gamma} = p\,x^2 - h_0\,.$$

C'est la funiculaire déplacée de h_0.

La charge est constante, et partout h_0.

Art. 4. — Projection de chaînette.

$$y = k\left(e^{\frac{x}{k}} + e^{-\frac{x}{k}} - 2\right)$$

Pour une charge h_0 à la clef :

$$H = \gamma\, h_0\, \rho_0 = \gamma\, h_0\, \frac{p^2}{2\,k}$$

La ligne de charge est :

$$y_1 = y - \frac{H}{\gamma}\frac{d^2y}{dx^2} = y - \frac{h_0\, p^2}{2\,k}\cdot\frac{k}{p^2}\left[e^{\frac{x}{p}} + e^{-\frac{x}{p}}\right] = \frac{1}{k}\left(k - \frac{h_0}{2}\right)y - h_0$$

Pour $k = +\frac{h_0}{2}$, $\qquad y_1 = -h_0$.

La ligne de charge est une droite.

Ainsi, la projection de chaînette $y = \frac{h_0}{2}\left(e^{\frac{x}{p}} + e^{-\frac{x}{p}} - 2\right)$ a comme ligne de charge la droite $y_1 = -h_0$.

La poussée est :

$$H = \gamma\, h_0 \frac{p^2}{h_0} = \gamma\, p^2.$$

On peut donc écrire l'équation sous cette forme :

$$y = \frac{h_0}{2}\left[e^{\frac{x}{\sqrt{\frac{H}{\gamma}}}} + e^{-\frac{x}{\sqrt{\frac{H}{\gamma}}}} - 2\right].$$

Nous la retrouverons.

Art. 5. — Courbe pouvant remplacer une projection de chaînette : $y = \frac{m\,x^2}{n^2 - x^2}$.[1] — La charge est :

$$Z = y - y_1 = \frac{H}{\gamma}\,\frac{2\,m\,n^2\,(n^2 + x^2)}{(n^2 - x^2)^3};$$

sur la clef : $h_0 = \frac{H}{\gamma}\,\frac{2\,m}{n^2}$.

Art. 6. — Ogive (f₁₃).

On a pour l'arc de gauche O A :

$$y = y' - \sqrt{r^2 - (x + x')^2}.$$

La charge est :

$$Z = y - y_1 = \frac{H}{\gamma}\,\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{H}{\gamma}\,\frac{r^2}{\left[r^2 - (x + x')^2\right]^{\frac{3}{2}}};$$

Sur la clef :

$$h_0 = \frac{H}{\gamma}\,\frac{r^2}{y'^3}.$$

A la clef, la compression N' sur l'arc de gauche est inclinée sous l'horizon de :

$$\text{Tang}\,\theta_0 = \frac{x'}{y'}, \qquad N' = \frac{H}{\cos\theta_0}.$$

1. — Voir Tome III, p. 337.

Sur l'arc de droite, la compression N'' = N' est inclinée de même sur l'horizon.

Il faut, pour l'équilibre, charger la pointe de l'ogive d'un poids :

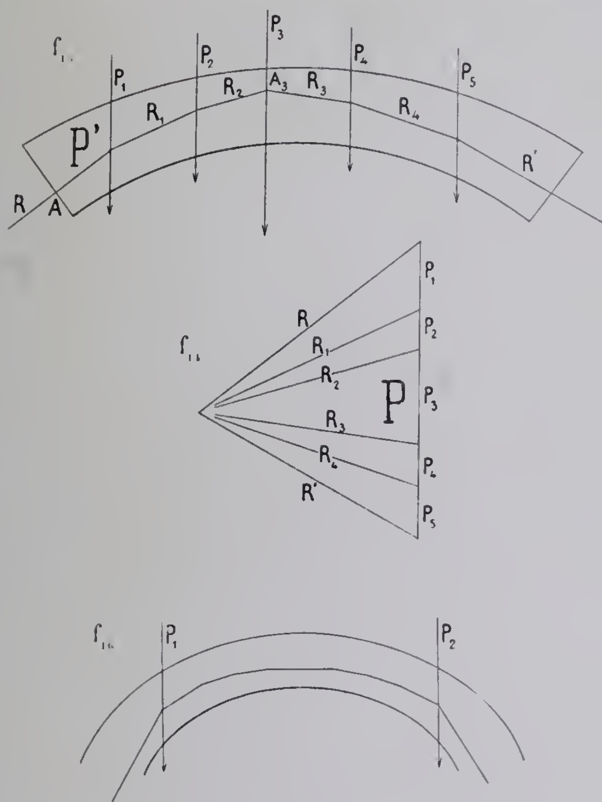
$$P = 2\ N' \sin \theta_0 = 2\ H\ \text{Tang}\ \theta_0 = 2\ \gamma\ h_0 \frac{y'^3}{r^2} \times \frac{x'}{y'} = 2\ \gamma\ h_0 \frac{x'\ y'^2}{r^2}$$

§ 3. — *RELATION ENTRE QUELQUES FORMES DE FUNICULAIRES ET QUELQUES DISPOSITIONS DES CHARGES*

Soient P_1, P_2, P_3, P_4,......... les charges (f_{14}).

Supposons que l'on ait déterminé une des réactions R et son point d'application A.

Construisons le polygone des forces P (f_{14}) et le funiculaire P' (f_{15}).



Si un poids lourd P_3 est appliqué en A_3, le funiculaire y a une chute : contre P_3, la voûte fait pointe.

Si c'est au sommet, on brisera la voûte en ogive.

Réciproquement, il faut charger la clef d'une ogive [5].

Si la voûte, peu chargée au cerveau, porte aux reins deux poids isolés P_1, P_2 (f_{16}), le funiculaire, plat au cerveau, aura une chute aux reins.

Réciproquement, pour la stabilité d'une voûte dont ce funiculaire est la fibre moyenne, il faut peu de charge au cerveau, deux poids isolés aux reins.

Si, sur le dos d'une voûte, court un viaduc, le funiculaire est un polygone dont chaque sommet est sous une pile du viaduc.

Les charges et la fibre moyenne sont réciproques.

Si la fibre moyenne a été tracée pour une certaine disposition des charges, il faut, pour la stabilité, lui faire porter ces charges-là.

Par exemple, on ne doit décintrer une voûte en ogive qu'après l'avoir chargée à la clef ; une voûte en arc de cercle cambrée en vue du poids des tympans, qu'après avoir construit les tympans.

Les derniers côtés d'un funiculaire de poids verticaux ne sont jamais verticaux : il y a toujours une poussée horizontale aux retombées.

5. — C'est ainsi qu'on a judicieusement chargé d'une petite chapelle la clef du pont de Martorell (Tome III, p. 313).

On peut l'annuler, soit complètement par une arche voisine de même poussée, soit partiellement par une arche de poussée moindre.

Mais dans une voûte isolée, la fibre moyenne n'est jamais verticale aux naissances : ceci condamne les pieds-droits verticaux et justifie les culées perdues.

On reviendra plus tard avec détails sur tout ceci : c'est assez important pour être dit deux fois.

CHAPITRE III

VOÛTE D'ÉPAISSEUR FINIE

SOUMISE A DES CHARGES OU SURCHARGES CONTINUES

RECHERCHE PAR LE CALCUL DE LA FORME A LUI DONNER
POUR QUE LE TRAVAIL MAXIMUM Y DÉPASSE PEU LE TRAVAIL MOYEN
C'EST-A-DIRE POUR QUE LES COURBES DE PRESSION
S'ÉCARTENT PEU DE LA FIBRE MOYENNE

§ 1. — *HYPOTHÈSES ADMISES*

Je laisse de côté, comme peu ou point appliquées, les méthodes de Carvallo [6], Yvon Villarceau [7], Saint-Guilhem [8], et rappelle seulement les recherches de Denfert-Rochereau [9, 10], de MM. Tourtay, Legay, Tolkmitt. Après Denfert-Rochereau, voici ce qu'ils admettent :

La courbe limitant la charge est une droite horizontale à h_0 au-dessus de la tangente au sommet : la surface de charge est continue, homogène, sans vides, même si les tympans sont évidés.

La voûte n'est soumise qu'à des forces verticales.

On a précédemment établi [11] que, réduite à sa fibre moyenne, courbe funiculaire, cette voûte est la projection de chaînette :

$$y = \frac{h_0}{2}\left[e^{\frac{x}{\sqrt{\frac{H}{\gamma}}}} + e^{-\frac{x}{\sqrt{\frac{H}{\gamma}}}} - 2\right] \quad [12]$$

h_0 est la charge sur la clef en hauteur de maçonnerie, H la poussée horizontale, γ le poids du m. c. de maçonnerie.

6. — Annales des Ponts et Chaussées, 1853-1.

7. — Revue générale de l'Architecture et des Travaux Publics, 1844, p. 58 « *Equilibre des voûtes en berceau cylindrique* ».

8. — Après Yvon Villarceau, Saint-Guilhem suppose « *que la maçonnerie des reins et la surcharge de « la voûte produisent sur l'extrados le même effet qu'un liquide homogène affectant la même forme et « ayant la même densité que le massif de la voûte ;...* »

Il a donné des tables permettant de tracer l'intrados et l'extrados, de façon que la courbe de pression coïncide avec la fibre moyenne.

Annales des Ponts et Chaussées, 1859, 1er semestre, p. 83 « *Mémoire sur l'établissement des arches de pont assujetties aux conditions du maximum de stabilité* ».

On a appliqué sa méthode à l'arche de 40m de Signac, 1871-72 (Tome I, p. 131), à la voûte de 33m sur la Gimone (Ligne de Toulouse à Auch), 1875-76...

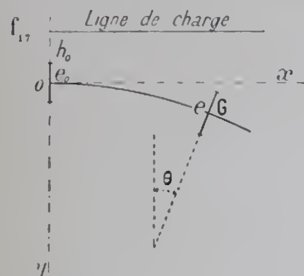
9. — Le défenseur de Belfort, alors Capitaine du Génie, Professeur à l'Ecole d'Application de Metz.

10. — Revue générale de l'Architecture et des Travaux Publics, 1859 « *Mémoire sur les voûtes en bereeau portant une surcharge limitée à un plan horizontal* ».

11. — Chap. II, § 2, art. 4.

12. — Dans son Mémoire « sur l'équilibre des voûtes en berceau » (Annales des Ponts et Chaussées, 1840, I, p. 56), Méry avait signalé p. 69 « *l'analogie entre la chaînette et la courbe de pression* ».

La projection verticale $e \cos \theta$ de l'épaisseur e en un point quelconque est constante : c'est l'épaisseur à la clef e_0 (f_{17}).



Dans une section quelconque la pression moyenne est :

$$\frac{N}{e} = \frac{N}{\frac{e_0}{\cos \theta}} = \frac{N \cos \theta}{e_0} = \frac{H \left(\begin{smallmatrix}\text{poussée}\\ \text{horizontale}\end{smallmatrix}\right)}{e_0}$$

Elle est constante.

§ 2. — *MÉTHODE DE M. TOURTAY* [13]

M. Tourtay s'est proposé de déterminer, non la fibre moyenne, mais l'intrados, puis l'extrados de la voûte.

Il la suppose d'abord réduite à un filet élémentaire, projection de chaînette.

Pour passer à la voûte épaisse, voici son ingénieux raisonnement :

« *Imaginons.... qu'au lieu d'avoir un seul filet supportant la charge totale,*
« .... *nous superposions par le sommet un nombre* n *de ces filets, chacun d'eux*
« *supportant une fraction* $\frac{1}{n}$ *de la charge, et faisons croître* n *indéfiniment* [14]. »

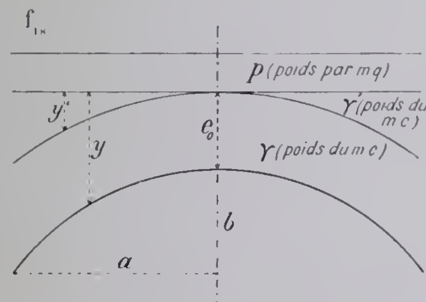
Si on pouvait superposer les filets sans vide, on constituerait une voûte ayant partout la même pression moyenne.

Il reste toujours du vide ; mais on détermine les constantes de manière à le réduire à un minimum négligeable pour les voûtes surbaissées à plus de 1/7.

Dans une voûte ainsi constituée, on peut tracer une courbe de pression passant, à très peu près, au milieu de tous les joints.

Tous les filets, en particulier les courbes d'intrados et d'extrados, la fibre moyenne, toutes les courbes de pression, sont des projections d'une même chaînette.

Soit : $k = \frac{1}{2}\left(\omega + \frac{1}{\omega} - 2\right)$



M. Tourtay établit [15] des formules qui se résument ainsi : (voir f_{18} pour le sens des lettres).

$$\frac{1}{k} = \frac{p + \gamma e_0}{\gamma' b}\left[1 - \frac{e_0 b \left[\frac{\gamma}{\gamma'} - 1\right]}{\frac{\gamma e_0 b}{\gamma'} + a^2 \left(\frac{\omega - 1}{\omega + 1}\right)^2 \frac{1}{(\text{Log. nep. } \omega)^2}}\right]$$

13. — « *Etude sur le calcul des arches surbaissées en maçonnerie* », par C. Tourtay, Ingénieur des Ponts et Chaussées.
Revue Générale de l'Architecture et des Travaux Publics, — 43e volume, Paris, André, Daly fils et Cie, 1886, p. 15.

14. — ...id..., p. 20.

15. — *loc. cit., renvoi 13*, p. 20, 64 et suivantes.
Dans une note du 11 novembre 1891 (non publiée), M. Tourtay a retrouvé des équations de même forme pour une chaussée en chaînette aplatie.
Voir aussi « Note sur la Construction du Pont Boucicaut » par M. Tourtay.
Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1892, p. 482 et suivantes.

Intrados : $$1 + \frac{k}{b} y = \frac{1}{2}\left[\omega^{\frac{x}{a}} + \omega^{-\frac{x}{a}}\right]$$

Extrados : $$y' = y \frac{\gamma - \frac{k}{b}(p + \gamma e_0)}{\gamma - \gamma'},$$

Pression moyenne à la clef en kg/1^{mq} $$\beta_0 = \frac{(p + \gamma e_0)(k + 2)}{\text{Log. nep.}\ \dfrac{\gamma - \gamma'}{\gamma - \dfrac{p + \gamma e_0}{b} k}}$$

M. Tourtay a appliqué ses formules à nombre de grandes voûtes très minces [16]. M. de Tedesco en a donné des tables et des graphiques [17].

§ 3. — *MÉTHODE DE M. LEGAY*

M. Legay [18] retrouve d'abord pour la voûte infiniment mince la projection de chaînette, qu'il appelle « caténoïde » [19].

$$y = \frac{h_0}{2}\left\{ e^{\frac{x}{\sqrt{\frac{H}{\gamma}}}} + e^{-\frac{x}{\sqrt{\frac{H}{\gamma}}}} - 2 \right\}$$

Puis, il passe à une voûte d'épaisseur finie ; il la suppose d'abord articulée aux reins et à la clef, en détermine la courbe de charge et la remplace par une horizontale équivalente, à h_0 au-dessus de la clef.

Il détermine h_0, soit par essais successifs, ou mieux comme suit : il suppose la voûte en caténoïde avec h_0 arbitraire, cherche la courbe de pression passant par les milieux de la clef et des naissances, exprime que pour $x = \frac{2a}{3}$ la courbe de pression et la caténoïde ont même ordonnée : cette relation donne h_0.

La caténoïde, fibre moyenne, et la courbe de pression, déjà communes à la clef et aux naissances, se coupent ainsi pour $x = \frac{2a}{3}$ point où, en général, le centre de pression est le plus loin de la fibre moyenne.

16.

Dates	Ponts (en arcs très surbaissés)	Nombre d'arches	Portée	Surbaiss^t
1888-1890	Boucicaut, sur la Saône (α)	5	40^m	1/8
1897-1899	d'Iguerande, sur la Loire (β)	7	28^{m}60	1/7,62
1898-1899	de Lays, sur le Doubs (β)	5	26^m	1/7,47
1900-1904	d'Arciat, sur la Saône (α)	7	31^m	1/7,12
1904-1908	de Digoin, sur la Loire (β)	9	26^m	1/7,4

α. Intrados en projection de chaînette.

β. Intrados en arc d'anse de panier ayant à la clef et aux retombées les rayons de la projection de chaînette.

17. — *Tables et graphiques pour le calcul des arches surbaissées en maçonnerie, d'après la méthode de M. Tourtay.* — Paris, Baudry, 1891.

18. — « *Méthode sur le tracé et le calcul des voûtes en maçonnerie* » par M. Legay, Ingénieur des Ponts et Chaussées.
Annales des Ponts et Chaussées, 4e trimestre 1900.

19. — On avait, précédemment, appelé caténoïde la surface engendrée par une chaînette tournant autour de sa base.
« *Les fonctions elliptiques et leurs applications* » par Alfred-George Greenhill. Traduit de l'anglais par J. Griess, Paris, Carré, 1895, p. 138.
C'est un cas particulier des « élassoïdes », étudiées par Ribaucour, Ingénieur des Ponts et Chaussées (mort en 1893).

Pour réduire encore l'écart dans les voûtes peu surbaissées $\left(\sigma > \frac{1}{4}\right)$, il prend comme courbe d'essai la caténoïde, déterminée comme plus haut, puis la rectifie par une funiculaire passant par les milieux de la clef et des naissances.

M. Legay adopte comme fibre moyenne la « caténoïde » de la voûte supposée articulée : comme elle ne l'est pas, la courbe de pression ne coïncide plus avec elle : il calcule les écarts des deux courbes et les trouve faibles.

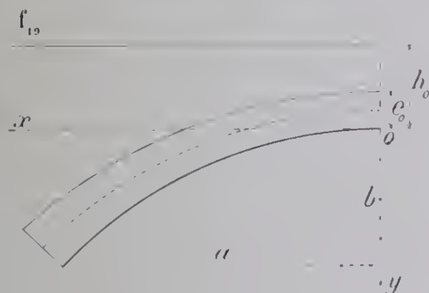
Il a donné des tables permettant de calculer, suivant la portée et le surbaissement, les éléments des caténoïdes.

Il a appliqué ses formules au pont d'Orléans [20].

§ 4. *MÉTHODE DE TOLKMITT* [21, 22]

Cette méthode est très usitée en Allemagne, en Autriche.

Tolkmitt prend comme fibre moyenne la funiculaire des poids morts et de la 1/2 surcharge, passant par les milieux de la clef et des retombées.



Il trouve entre x et y (de l'intrados) une équation fort compliquée que l'on résout à l'aide de tables numériques qu'il donne, mais que, fort judicieusement, il remplace avec très peu d'écart, par une équation de la forme suivante, qui est simple et pratique :

$$y = \frac{m\,x^2}{a^2\,\frac{b+m}{b} - x^2} \quad \text{(courbe étudiée p. 337).}$$

Soit ρ_0 (rayon de courbure à la clef) $= \frac{a^2}{2\,b\,m}\,(b+m)$.

La courbe peut s'écrire :

$$y = \frac{x^2}{2\,\rho_0 - \frac{2\,b\,\rho_0 - a^2}{a^2\,b}\,x^2}.$$

Soit encore h_0 la charge sur la clef, exprimée en hauteur de maçonnerie

Tolkmitt établit les deux formules :

$$\rho_0 + e_0 = \frac{a^2}{4\,h_0}\left[\frac{h_0}{b} + \frac{1}{8} + \frac{2\,e_0\,h_0}{a^2}\sqrt{\left(\frac{h_0}{b} + \frac{1}{8} + \frac{2\,e_0\,h_0}{a^2}\right)^2 + \frac{8\,e_0\,h_0}{a^2}}\right]$$

$$H\left(\begin{array}{l}\text{poussée horizontale à la clef sur 1 m. de largeur de}\\ \text{voûte, composante horizontale constante de l'effort sur}\\ \text{chaque section — en kg.}\end{array}\right) = (\rho_0 + e_0)\,h_0\,\gamma\left(\begin{array}{c}\text{poids en kg d'un m. c.}\\ \text{de maçonnerie.}\end{array}\right)$$

Si on se donne la poussée par m. q. à la clef β_0 :

$$H = e_0\,\beta_0$$

20. — Tome III, p. 255.

21. — « *Leitfaden für das Entwerfen und die Berechnung gewölbter Brücken* », von G. Tolkmitt, Koniglicher Baurat (3e édition, Berlin, Wilhelm Ernst et fils, 1912).

22. — Mort en 1900.

§ 5. *OBSERVATIONS SUR TOUTES CES MÉTHODES*

Toutes ces méthodes, d'ailleurs fort ingénieuses, reposent sur des hypothèses qui ne laissent pas de prêter à la critique.

Pour une très grande voûte, il est plus sûr, plus clair, de construire ses courbes de pression, puis de tracer un intrados et un extrados qui les encadrent au mieux.

On a dit ceci au Chapitre I : il est bon de le redire.

CHAPITRE IV

UN ARC EST DIT ÉLASTIQUE QUAND LES DÉFORMATIONS Y SONT PROPORTIONNELLES AUX EFFORTS (*Hypothèse de Hooke*), ET QU'UNE SECTION PLANE RESTE PLANE APRÈS FLEXION (*Hypothèse de Navier*). DANS QUELLES LIMITES EST-CE VRAI POUR LES VOÛTES, ET A-T-ON LE DROIT DE LES CALCULER COMME ÉLASTIQUES ?

§ 1. *EXPÉRIENCES DE LABORATOIRE*

POUR LES VOÛTES EN PIERRE, IL N'Y A PAS, A PROPREMENT PARLER, DE COEFFICIENT D'ÉLASTICITÉ, C'EST-A-DIRE QUE, POUR ELLES, L'HYPOTHÈSE DE HOOKE EST FAUSSE.

Pour qu'on puisse supposer les voûtes élastiques, c'est-à-dire pour qu'il soit permis de leur appliquer les formules de déformation, il faut tout d'abord que le coefficient d'élasticité E soit constant pour un même « matériau » sous tout effort inférieur à la limite d'élasticité ; puis, pour la pratique du calcul, qu'il soit le même, non seulement pour chaque matériau, mais tout le long de la fibre moyenne, au moins pour chaque tranche, à condition de tenir alors compte de ses variations de tranche à tranche.

Or, toutes ces hypothèses sont fausses.

Pour chaque « matériau » de voûte (moellon, mortier, béton), le coefficient d'élasticité varie avec l'effort. [23]

Il varie entre deux pierres de même carrière et de même préparation, entre deux briques de même fournée, entre deux bétons de même composition et même âge. [24]

Toutefois, il est à peu près le même à la traction pour les bonnes marques de ciments lents [25].

23. — M. C. Bach a fait de très nombreux essais. Voici, d'après quelques-uns d'entre eux, la valeur de :

$$\varepsilon = \frac{E\,(\text{Kg.}/_{1^{m_q}})}{10^9} = \frac{\beta(\text{travail en kg}/\overline{0^m01^2})}{10^5 \times \frac{\Delta l}{l}}.$$

(**On a écrit en italique ce qui concerne les essais à la traction.**)

Matériaux essayés.	Résistance à la rupture (kg/$\overline{0^m01^2}$) (mesurée sur des cubes)	Entre les efforts β (kg $\overline{0^m01^2}$)	ε	Sources
Ciment Portland pur — 83 jours.		0k — 8k 31,8 — 39,8	2,12 1,67	*Versuche über die Elastizität und Druckfestigkeit von Körpern aus Zement, Zementmörtel und Beton*, von C. Bach. (Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1896, p. 1381.)
Mortier de ciment 1.3.	191k7	0 — 8 32,1 — 40,1	2,38 1,62	
Béton 1 — 2 ½ — 5.	137,7	0 — 7,9 31,7 — 39,6	3,32 2,07	
Béton 1 — 5 — 10.	106,8	0 — 7,9 31,6 — 39,5	2,58 1,52	
Granit.	1006	0 — 13,8 27,5 — 41,3 137,7 — 165,2	1,66 1,23 2,19	*Untersuchung von Granit inbezug auf Zug-, Druck-, Biegungs-, und Schubfestigkeit, sowie in Hinsicht auf Zug-, Druck-, und Biegungs-Elastizität*, von C. Bach, (Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1897. p. 241.)
Granit.	*15,4*	*0 — 4,8* *19,1 — 29,2*	*2,3* *0,6*	
Granit.	1597	0 — 14,6 76,6 — 89 126,1 — 163,3	4,67 3,97 4,03	*Versuche zur Ermittelung der Zusammendrückung (Elastizitätsversuche) und der Druckfestigkeit*, von C. Bach. (Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure. 1903, p. 1445.)
Marbre.		0 — 24,25 48,29 — 72,23	1,61 2,79	*Elastizität und Festigkeit*. von Dr. Ing. C. Bach (Fünfte vermehrte Auflage). Berlin, J. Springer, 1905, p. 67 et suivantes
Marbre.		*0 — 3,6* *10,8 — 11,1*	*1,40* *0,69*	
Grès.		*0 — 1,2* *12,3 — 16,3*	*0,93* *0,21*	*Zur Frage der Proportionalität zwischen Dehnungen und Spannungen bei Sandstein*, von C. Bach. (Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1900, p. 1169.)
Grès.		*0 — 1,35* *12,8 — 17*	*0,48* *0,17*	

La **compression** β augmentant, ε a diminué pour le ciment, le mortier, le béton, le grès, suivant une loi exprimée par la formule $\frac{K}{\beta^n}$. K constante, n autre constante <1.

Pour le granit, ε décroit d'abord, puis augmente ; pour le marbre, il augmente.

La **traction** β augmentant, ε diminue pour le marbre et le grès.

24. — Expériences autrichiennes :

(Voir plus loin § II, art. 2.)

	Dosage			$\varepsilon = \frac{E\,(\text{kg}\ \overline{0^m01^2})}{10^5}$	
	Ciment	Sable	Pierre cassée	à la traction	à la compression
Grès					1,37 à 2,71
Briques					0,45 à 1,62
Béton	1	3	5	0,98	[illegible],74
Béton	1	2	3	2,80	
Béton	1	1	1	2,50	2,64

Bericht des Gewölbe-Ausschusses des Oesterr. Ingenieur und Architekten. - Sonderabdruck aus der Zeitschrift der Oesterr. Ingenieur und Architekten Vereines, 1895, p. 41, 42.

25. — Pour la pâte pure, d'âge variant de 28j à 106j, ε augmente de 1,8 à 3. Quand il est 1,8 pour la pâte pure, il atteint 2,1 pour le mortier à 600k et le béton à 1000k (1v - 1v).

Expériences faites par le Service des Phares et Balises sur la résistance et l'élasticité des ciments Portland, M. de Joly, Ingénieur des Ponts et Chaussées. (Annales des Ponts et Chaussées, 1898, 3e trimestre, p. 198 à 242).

Il n'est pas le même à la compression et à la flexion [26].

La proportion de mortier, la nature et la taille des voussoirs, sont différentes dans les bandeaux, la douelle et le queutage ; dans sa section transversale, la voûte est hétérogène : il est impossible de déduire du coefficient d'élasticité de chaque « matériau » d'une voûte, le coefficient d'élasticité moyen de la voûte [27].

On exécute les grandes voûtes par rouleaux, par tronçons, avec clavages matés, sur des cintres qui se déforment : même homogènes comme matériaux, faites, elles ne le seraient plus.

Enfin, on ne peut pas calculer de même une voûte en matériaux bien réguliers, à joints minces, et une voûte en béton, masse homogène sans joints.

Voilà bien des objections à l'application aux voûtes des formules de déformation.

Dans quelle mesure l'ont confirmée ou infirmée les trop rares observations faites sur les voûtes ?

26. — M. Mesnager : « *Cours de Matériaux de Construction* » professé à l'Ecole des Ponts et Chaussées, 4e Partie : « *Pierres de Construction* », p. 68 et 72.

Expériences faites au Laboratoire de l'Ecole des Ponts et Chaussées :

		Coefficient d'élasticité à la compression	Coefficient d'élasticité à la flexion
Calcaires	Marbre blanc	6,06	7,31 à 8,02
	Pierre de Tonnerre (Yonne)	2	2,98 à 3,52
Terres cuites		0,40 à 0,65	0,52 à 2,70

27. — Voici quelques coefficients d'élasticité moyens de maçonneries :

Dans des essais sur des arcs en briques, M. de Perrodil avait trouvé pour $\frac{E\ (Kg\ \overline{0{,}01^2})}{10^5} = \varepsilon$: 0,19, 0,3.

Annales des Ponts et Chaussées, août 1882, p. 119. — La Commission des Annales observe que les déformations ont été excessives.

Dans leurs essais, indiqués plus loin (§ II, Art. 2 - *D*), les Ingénieurs autrichiens ont trouvé :

	Voûte	Matériaux de la voûte
Voûte en moellons ordinaires	0,604	1,37 à 2,71
Voûte en briques	0,278	0,45 à 1,62
Voûte en béton	2,46	

Des déformations observées à l'arche en pierre de taille de Souppes, M. Résal a deduit $\varepsilon = 2{,}5$.

« *Ponts en Maçonnerie* », Tome I, p. 49, Baudry 1887.

Pour les tours de phares, avec $\varepsilon = 3$, M. Ribière a retrouvé, à peu près, les durées des périodes de vibration enregistrées par son oscillographe.

Annales des Ponts et Chaussées, 1er trimestre 1905, p. 24.

La même valeur $\varepsilon = 3$ correspond encore à la flexion de 4mm d'une pile de 44m05 de hauteur du viaduc de la Sumène, pendant l'arrêt brusque d'un train subitement serré à bloc.

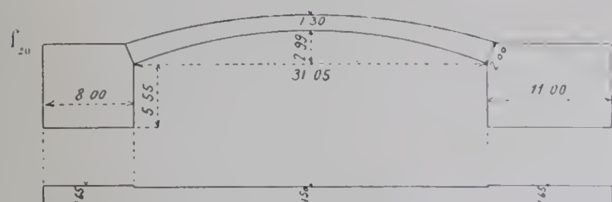
Annales des Ponts et Chaussées, janvier-février 1910, p. 64 : « *Note sur la construction du viaduc des Fades, ligne de Saint-Eloy à Pauniat* », M. Virard.

M. Boisnier, en comparant deux mouvements à peu près égaux des voûtes du pont de Constantine (Tome II, p. 107), la contraction de l'arc sous une pression de 12k, sa dilatation pour $\tau = 9°$ avec $\alpha = \frac{7}{10^6}$ a trouvé : $\varepsilon = 2$.

Annales des Ponts et Chaussées, mai-juin 1912, p. 505.

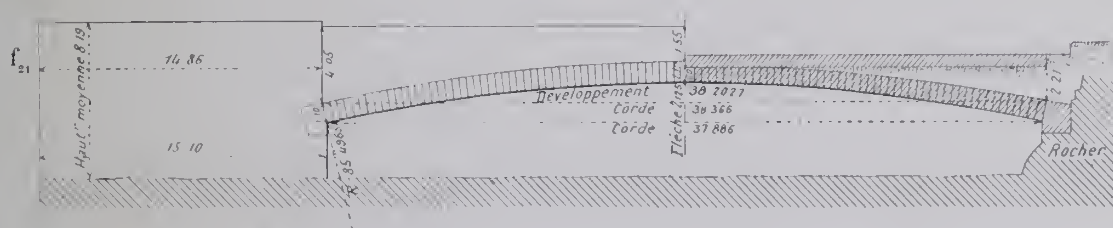
§ 2. — *EXPÉRIENCES SUR DES VOÛTES* [28]

Art. 1. — Arceau d'essai de Vassy (arc de 31m05 à 1/10,37), en moellons ordinaires dressés en coupe, mortier de ciment (1845-1846) (f_{20}). Épreuves au choc (30 mai 1846) [29].



2762k tombant de 27cm, puis de 37cm, produisent, des oscillations estimées 2cm, non mesurées.

Art. 2. — Expérience faite dans les carrières de Souppes (Seine-et-Marne) (1865-66). Arc de 37m886 au 1/18e, de 3m50 de largeur (f_{21}). Dépenses : 33.583 fr. [30]



A. - Voûte. — Voûte en pierre de taille avec lits et joints parfaitement plans. Mortier à 600k de ciment pour 0mc800 de sable. Joints de 12mm ; ceux des naissances fichés les derniers.

La voûte a été exécutée du 26 octobre au 14 novembre 1864, décintrée le 15 mars 1865.

28. — Je rappelle, pour ordre, les expériences de Boistard de 1796.

Avant de construire le pont de Nemours (fondations 1796-97, voûtes 1803), il éprouva 22 voûtes de divers intrados, ayant toutes une portée de 8 pieds (2m60), une épaisseur uniforme de 4 pouces (0m11), en voussoirs égaux, composés chacun de deux briques polies au grès sur une face, jointes au plâtre sur l'autre ; — pas de mortier entre les voussoirs.

« *Expériences sur la stabilité des voûtes* » par L. C. Boistard, Ingénieur en Chef du Corps impérial des Ponts et Chaussées (Recueil de divers Mémoires extraits de la Bibliothèque impériale des Ponts et Chaussées, publié par P. C. Lesage, Ingénieur en Chef de 1re classe, — Paris, Firmin-Didot, 1810, IIe Partie, p. 171 à 217, Pl. XI à XVI).

Les voûtes éprouvées par Boistard ne ressemblent guère aux voûtes usuelles, à mortier, à épaisseur croissante à partir de la clef.

29. — Notice de Belgrand, alors Ingénieur ordinaire des Ponts et Chaussées, du 22 octobre 1846, dans le dossier de l'arche d'essai de Souppes (exécutée 20 ans plus tard).

Service de la Navigation de la Seine (2e section) et des Ponts de Paris, — Archives (carton 30, dossier 3).

30. — « *Notice sur la construction d'une arche d'essai très surbaissée* » par M. Féline-Romany, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées.

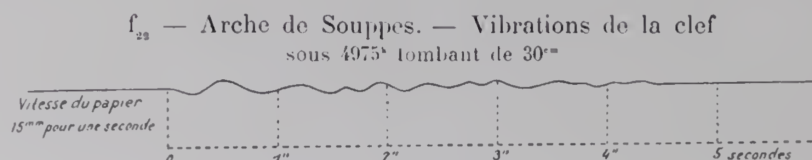
Annales des Ponts et Chaussées, Tome XII, série 4, juillet et août 1866, p. 10 à 17, Pl. 124.

B. - Essais [31]. — Sous une charge uniforme par m. q. de 681^k et 656^k, la clef s'abaissa de 8^{mm} et 9^{mm} : la charge enlevée, plus d'abaissement.

Au passage d'un chariot de 5510^k, dont 4975^k sur l'essieu d'arrière, la voûte, déjà chargée à 656^k par m. q., fléchit dès l'entrée du chariot, s'abaisse de $0^{mm}3$ au passage sur la clef, puis reprend sa position.

4975^k tombant de 30^{cm} font une oscillation de $2^{mm}8$ à la clef (f_{22}), $0^{mm}6$ au plus aux reins.

f_{22} — Arche de Souppes. — Vibrations de la clef
sous 4975^k tombant de 30^{cm}



Cette voûte homogène, en pierre de taille, s'est comportée comme un arc élastique.

Art. 3. — Observations aux ponts de Lavaur et Antoinette et au pont de Morbegno.

— Se sont aussi comportées comme des arcs élastiques :

Sous les trains, les voûtes de Lavaur [32] et Antoinette [33] ;

Sous un changement de température, celle de Morbegno [34], c'est-à-dire que les formules « de déformation » s'y sont appliquées [35].

Art. 4. — Expériences de l'Association des Ingénieurs et Architectes autrichiens (1890-1891) [36].

A. - Voûtes essayées. — Ce sont les premiers essais faits pour vérifier l'application aux voûtes des formules « de déformation ».

Je laisse de côté ceux sur arcs en béton armé et en métal.

On a essayé :

7 voûtes de 1^m35 et 7 de 2^m70, — 3 de 4^m05 ; 1 de 10^m au 1/10 en béton ; — 3 de 23^m en arc surbaissé à 1/5 (portée 23^m, flèche 4^m60, largeur 2^m), savoir :

une en moellons ordinaires de grès, de 0^m60 à la clef, 1^m10 aux retombées (mortier : ciment 1^v, sable 2^v6) ;

une en briques, même mortier, mêmes épaisseurs ;

une en béton de 0^m70 d'épaisseur uniforme : noyau à $1^v - 3^v - 5^v$; intrados et extrados : $1^v - 2^v - 3^v$, $1^v - 1^v - 1^v$, là où, sous une surcharge dissymétrique, on prévoyait des efforts de traction.

31. — « *Note sur l'arche d'essai des carrières de Souppes* » par M. de Lagrené, Ingénieur des Ponts et Chaussées.
Annales des Ponts et Chaussées, Tome XVI, 4e série, août 1868, p. 130 à 146, Pl. 170, 171.

32. — Tome II, p. 143, 144. 33. — Tome II, p. 149. 34. — Arc semi-articulé, Tome IV, p. 65.

35. — Pour 34° d'écart, le mouvement de la clef a été de 33^{mm}.
En calculant la voûte avec les formules de déformation d'un arc élastique, M. Guidi, pour une variation de 34° et le coefficient de dilatation $\alpha = 8 \times 10^{-6}$ a trouvé 37^{mm}.
« *Influenza della temperatura sulle costruzioni murarie* », Camillo Guidi, Turin 1906, p. 9.

36. — Source indiquée au renvoi 24.

Les deux voûtes en béton (celle de 10m, celle de 23m) étaient posées aux naissances sur plaques d'asphalte : elles étaient donc un peu articulées en deux points. On ne pouvait pas en conclure grand'chose pour les voûtes inarticulées.

B. - Conclusions de M. le Professeur Brick. — Voici les conclusions qu'a dégagées des expériences l'un des rapporteurs, M. le Professeur Brick :

1. — Pendant les premières charges, avant les premières fissures, les déformations des axes des voûtes ont augmenté à peu près proportionnellement à la charge.

2. — La charge dépassant une certaine valeur « critique », il se produit des fissures, là où la tension dépasse : soit, dans les voûtes appareillées, l'adhérence du mortier au moellon ; soit, dans les voûtes en béton, la résistance à l'extension du béton.

3. — Dans les voûtes appareillées, les fissures suivent le joint ; dans les voûtes en béton, elles sont irrégulières et se ramifient.

4. — Elles se produisent au 1/4, au 1/3, aux 2/3, aux 3/4 de la portée, et aux retombées ; en général, là où le calcul, fait dans l'hypothèse élastique, indique des sections dangereuses.

5. — Au moment où apparaît la fissure, la fibre moyenne ne change pas brusquement de forme.

6. — Les fissures ouvertes, la voûte ne résiste plus à la tension ; mais elle continue à tenir par sa résistance à la compression, laquelle est beaucoup plus grande. La charge de rupture a dépassé la charge critique de 30 % pour la maçonnerie ordinaire, 59 % pour les voûtes en briques, 31 % pour les voûtes en béton. C'est très heureusement la résistance à l'écrasement qui mesure la résistance de la voûte.

C. — Ce qu'il faut retenir. — En résumé, tant qu'il n'y a pas eu tension, et pour les premières surcharges, les voûtes paraissent, en général, s'être comportées comme des arcs élastiques.

C'est à cette modeste conclusion qu'aboutissent, en somme, ces expériences si vantées [37].

Il y avait peut-être plus à apprendre de l'essai de Souppes, plus vieux de 25 ans.

37. — L'Association des Ingénieurs et Architectes autrichiens a institué une deuxième « Commission des voûtes » (Gewölbe-Ausschuss). Elle a publié deux rapports :

1° - 4 avril 1900 : « *Elasticité et résistance de prismes en pierre de taille, moellons, béton, béton « armé, briques creuses et ordinaires, chargés suivant leur axe et excentriquement* ».

Zeitschrift des Œsterr. Ingenieur und Architekten Vereines. (Supplément au n° 25 de 1901).

2° - avril 1910 : « *Voûtes de bâtiments en arc, en béton, béton armé, briques, appuyées sur des « poutres en* I. »

Vienne, — Edition de l'Association.

Art. 5. — Insuffisance des observations faites sur les voûtes. — D'observations continues, — j'entends pendant plusieurs années, — sur une voûte, je n'en sais pas.

Comment, depuis sa pose sur le cintre, s'accroît jusqu'au décintrement, puis jusqu'à l'achèvement de l'ouvrage, le travail d'un voussoir ; comment il varie ensuite avec les surcharges, la température, le soleil, l'imbibition ; comment, en un mot, à un moment quelconque, travaille chaque point d'une voûte, — tout cela nous ne le savons pas beaucoup mieux que les ingénieurs de Trajan.

Il y a plus de 2000 ans qu'on fait des voûtes, et l'on n'a pas encore un appareil simple, pratique, sûr, à mettre en toutes mains, permettant à toute époque de mesurer le travail, non pour de courtes périodes : décintrement, passage d'un train (ces instruments-là, on les a), [37 bis] mais après des années.

Si on avait un « baromètre » enregistrant continuement les pressions en chaque point d'une voûte, on n'imaginerait plus, on saurait.

§ 3. — *QUELQUES AUTRES INDICATIONS DE L'ÉLASTICITÉ DES MAÇONNERIES*

Art. 1. — Chute des arches du pont de Vernon [38]. — Le 14 octobre 1870, on fit sauter l'arche de rive gauche du pont de Vernon sur la Seine. Les piles voisines s'inclinèrent l'une après l'autre vers la rive gauche, laissèrent tomber les arches, puis se redressèrent, et reprirent à peu près leur ancienne position, avec si peu d'avaries qu'on appuya sur elles les nouvelles voûtes.

Art. 2. — Oscillations des phares sous les coups de vent. — Les tours des phares oscillent sous les coups de vent comme des tiges encastrées à leur pied [39].

37 bis. — Récemment, M. Mesnager, Professeur à l'École des Ponts et Chaussées, a rendu visibles, à l'aide de la double réfraction, les lignes d'égal travail, dans un modèle réduit en verre.

Annales des Ponts et Chaussées, 1913, juillet août, p. 135.

38. — 7 arches en anse de panier de 8^m25 de flèche, 26^m d'ouverture pour les 5 arches centrales, 28^m pour les deux arches de rive ; piles de 3^m50 d'épaisseur aux naissances fondées sur pilotis. Pont construit en 1858-1862.

Annales des Ponts et Chaussées, 1874, 2e semestre : « *Pont de Vernon* » M. Picquenot.

39. — Voici quelques déplacements observés :

Phare	construit en :	Amplitude des déplacements	Hauteur du phare
de la Coubre	Pierre calcaire de moyenne qualité, de petit appareil.	$1^{mm}5$	48^m5
des Baleines	Pierre de taille calcaire de bonne qualité, de grand appareil.	$1^{mm}5$	47^m
de Barfleur	Pierre de taille granitique de moyenne qualité, de grand appareil.	$0^{mm}5$	66^m
du Planier	Maçonnerie brute de moellons calcaires de très bonne qualité, — plus épaisse et beaucoup plus rigide que les précédentes.	Amplitude imperceptible	54^m
de l'Ile Vierge (Ancien et nouveau)	Maçonnerie brute en moellons de granit avec parements extérieurs en pierre de taille granitique.	Amplitude imperceptible	28^m et 70^m
de la Canche	Briques tendres de médiocre résistance, peu épaisses. Tour très légère avec cassure générale de haut en bas.	4^{mm}	48^m
de Calais	Briques tendres. Cassure générale de haut en bas.	2 à 3^{mm}	47^m

Annales des Ponts et Chaussées, 1er trimestre 1905, p. 24 « *Oscillations des tours de phares* », par M. Ribière, Ingénieur en Chef du Service central des Phares et Balises.

Art. 3. — Évasement du haut des nefs de cathédrales.

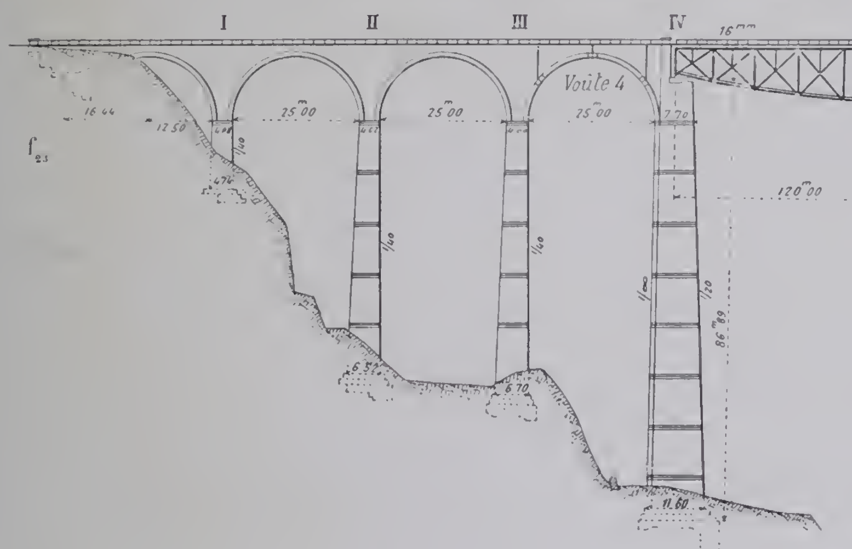
— Dans nombre de cathédrales (Laon [40], Bourges, Amiens, Reims, Dijon...), on observe qu'au-dessus des chapiteaux, les piliers s'inclinent vers le dehors [41].

On n'a pas voulu ce déversement : il est dû à la poussée des grandes voûtes de la nef.

Après, l'ensemble tient.

Art. 4. — Courbure élastique des piles IV et III du viaduc sur la Sitter (f_{23}). 1908-1910. (Ligne du lac de Constance au lac de Zurich).

La naissance de la pile-culée IV se déplaça horizontalement, vers la vallée :



de 45^{mm} jusqu'au clavage de la voûte 4 ; de 95^{mm} du clavage à l'achèvement ; en tout de 140^{mm} [42].

Pendant que la pile IV s'écartait de 45^{mm}, l'ouverture de la voûte 4 augmentait de 20^{mm} : la pile III s'est déversée vers la vallée, de : $45^{mm} - 20^{mm} = 25^{mm}$.

Sous les tympans, la clef de la voûte 4 baissa de 80^{mm}, sa portée s'accrut de 70^{mm} pour un déversement de 95^{mm} de la pile IV, soit, pour la pile III, un nouveau déversement de $95^{mm} - 70^{mm} = 25^{mm}$; en tout 50^{mm} [43].

40. — A Notre-Dame de Laon, « .....*le hors d'aplomb des colonnes varie, depuis les extrémités de la* « *nef jusque vers son milieu, de 8, 10, 12 et 15 centimètres, mesuré du sol jusqu'aux chapiteaux, et de* « *25 centimètres en sens inverse, depuis les chapiteaux jusqu'à la naissance des voûtes.*

« *Les murs forment donc exactement le genou.....*

« *Chose remarquable, un déplacement aussi considérable des murs s'est opéré sans désunions sensibles* « *dans les constructions. On n'aperçoit, ni dans les grandes voûtes supérieures de la nef, ni dans les voûtes* « *latérales des galeries, de ruptures graves qu'on doive rapporter à ce mouvement.* »

Exposition universelle de Vienne, 1873 : « *Les Monuments historiques de France* », — Paris, Imprimerie nationale, MDCCCLXXVI ; — Rapport de M. Biet, Inspecteur Général des Bâtiments civils, 20 juin 1846.

41. — Aux viaducs de la ligne d'Issy à Viroflay, M. Rabut a constaté de même que toutes les piles aux naissances s'écartent d'une voûte chargée.

(*Loc. cit.*, Titre II, renvoi 18, p. 358).

42. — correspondant à $\varepsilon = \dfrac{E \left(\text{coefficient d'élasticité en } {}^{kg}/_{\overline{cm}^2}\right)}{\overline{10}^5} = 0{,}5 \left(\begin{smallmatrix}\text{maçonnerie}\\ \text{fraîche}\end{smallmatrix}\right)$

43. — « *Der Sitterviadukt der Bodensee-Toggenburgbahn* », von den Ingenieuren A. Acatos, J. Lüchinger, F. Ackermann.

Sonderabdruck aus der Schweizerischen Bauzeitung, Band LVI, 1910 :

page 30, IV : « *Beobachtungen während der Bauausführung und der Belastungsproben* », von Ingenieur A. Acatos, St-Gallen.

Sous la charge d'épreuve de la travée métallique, la pile IV ne se déplaça que de 2^{mm}; les joints au-dessus des articulations des reins ne s'ouvrirent en haut que de 2^{mm}.

§ 4. — *CONCLUSIONS*

JUSQU'A CE QU'ON EN AIT UNE MEILLEURE,
POUR CALCULER LE TRAVAIL DES VOÛTES,
ACCEPTER, — MALGRÉ SES DÉFAUTS, — L'HYPOTHÈSE ÉLASTIQUE

Les essais, quoi qu'on en ait écrit [44, 45, 46, 47], ne justifient pas l'application aux voûtes des formules de déformation.

Pour les voûtes, on s'est de tout temps beaucoup trop pressé d'édifier des théories [48]. On a tout d'abord raisonné au lieu de regarder, — calculé au lieu de mesurer. On a couru de suite à des hypothèses permettant le calcul, — comme si l'on pouvait trouver quelque chose en dehors de l'expérience [49].

Les voûtes faites de matériaux élastiques sont certainement élastiques, mais non comme l'entend la Résistance des Matériaux : leur élasticité n'est pas si simple.

44. — « *...en se basant sur les essais de rupture et d'élasticité faits sur de grandes voûtes par l'Asso-* « *ciation des Ingénieurs et Architectes autrichiens, il n'est pas douteux qu'on puisse calculer de telles* « *voûtes et déterminer les forces intérieures avec une sécurité suffisante en pratique, en les considérant* « *comme des corps homogènes élastiques...* »

Fortschritte der Ingenieurwissenschaften, zweite Gruppe, 7 Heft : « *Gewölbte Brucken* », von Karl von Leibbrand, — Leipzig, 1897, p. 41 : « *Brucken mit Gelenkeinlagen, I.-Zweck der Gelenke.* »

45. — « *Déjà, depuis quelques dizaines d'années, Winkler, Culmann, Castigliano, et d'autres, avaient* « *entrevu que les voûtes en maçonnerie se comportent comme des solides élastiques, ainsi que l'ont abso-* « *lument confirmé les célèbres (« famose ») expériences de la Commission autrichienne des voûtes.* »

« *Influenza della Temperatura sulle costruzioni murarie* », p. 6, M. C. Guidi, — Turin, Décembre 1905, — extrait des « Atti della R Accademia delle Scienze di Torino », vol. XLI, Adunanza del 28 Gennaio 1906.

46. — « *Les classiques expériences de la Société des Ingénieurs autrichiens* » ont établi que les constructions en maçonnerie obéissent aux lois de l'élasticité.

« *I progressi della Scienza e dell' Arte del costruire* », — Discorso inaugurale del 1° Anno 1906-07 del R. Politecnico di Torino, p. 13, M. C. Guidi, — Turin 1906.

47. — « *...les précieuses (« verdienstvollen ») expériences de l'Association des Ingénieurs et Archi-* « *tectes autrichiens ont établi que les voûtes éprouvées se comportèrent en général comme des arcs élas-* « *tiques et qu'il est, par suite, justifié de calculer comme arcs élastiques des voûtes de même forme et de* « *même construction que les voûtes éprouvées...* »

« *Elastiche Bogenträger* », Dr. Jakob J. Weyrauch, Professor an der Kgl. Technischen Hochschule in Stuttgart. — Stuttgart, Konrad Wittver, 1911, — Préface de la 2ᵉ édition, p. III.

48. — C'est ainsi qu'étaient déjà nées au XVIIIᵉ siècle les théories de La Hire (1712), de Couplet (1729), de Bossut (1770), de Prony (1783), dont Boistard écrit fort justement : « *...il faut l'avouer, tous ces écrits* « *reposent sur une hypothèse qui n'est pas confirmée par l'expérience, en sorte qu'ils doivent être relégués* « *parmi les recherches de pure spéculation, très curieuses à la vérité, mais sans aucune utilité pour la* « *pratique.* »

Boistard, loc. cit., renvoi 28.

49. — « *L'expérience est la source unique de la vérité : elle seule peut nous apprendre quelque chose* « *de nouveau ; elle seule peut nous donner la certitude* ». Qui parle ainsi : un médecin? un physicien? un naturaliste ? — Non, c'est Henri Poincaré, le plus grand mathématicien de ce temps.

H. Poincaré : « *La Science et l'hypothèse* », Paris, Flammarion, 1912, 4ᵉ Partie, Chapitre IX. *Les Hypothèses en physique*, p. 167.

C'est cependant en les supposant telles, que les Ingénieurs autrichiens ont passé de la portée de 41^m du pont de Wäldlitobel[50] à celle de 65^m du pont de Jaremcze[51, 52].

Avec cette hypothèse, on a calculé nombre de grandes voûtes, dont quelques-unes minces, et qui ont tenu[53], des viaducs à arches de 25^m, extrêmement hardis et qui tiennent[54].

Donc, bien que les voûtes ne soient pas des solides homogènes, élastiques au sens de la Résistance des Matériaux ;

que le coefficient d'élasticité y varie d'un point à l'autre, c'est-à-dire qu'à proprement parler il n'y en ait pas, et que les déformations n'y soient pas proportionnelles à la pression ;

que les mouvements du cintre, les matages, y bouleversent les courbes de pression ;

il faut provisoirement continuer à les supposer telles.

On n'a pas, en ce moment, pour le calcul des voûtes, de meilleure hypothèse que l'hypothèse élastique.

50. — Tome II, p. 157. 51. — Tome III, p. 114.

52. — « ...*Si favorables que fussent les circonstances pour construire de grandes voûtes dans la* « *vallée du Pruth, il eût paru délicat de sauter d'un seul coup de 41^m à 65^m de portée, si les essais de* « *rupture de voûtes d'épreuves exécutés en juillet 1889 par l'Association des Ingénieurs et Architectes* « *autrichiens, n'eussent montré déjà que la théorie de l'élasticité appliquée aux voûtes, conduit à des* « *résultats concordant parfaitement avec l'expérience. Les grandes voûtes de la ligne Stanislau-Woro-* « *nienka sont le premier résultat qu'a obtenu l'Association des Ingénieurs et Architectes autrichiens par* « *les voûtes d'épreuve...* »

Zeitschrift des Oesterr. Ingenieur und Architekten Vereines, Tome XLV, n° 42, 20 octobre 1893 : « *Mittheilungen über die* « *grossen gewölbten Brücken der K. K. Staatsbahn Stanislau-Woronienka* », von Ober Inspektor Ludwig Huss, Vorstand des Bureaus für Unterbau und Brücken der K. K. General-Direktion der Oesterr. Staatsbahnen.

53. — Voûtes $\geqslant$ 40^m calculées avec l'hypothèse élastique :

Date	Pont de :	Symbole	Portée	Date	Pont de :	Symbole	Portée
$18\frac{93}{94}$	Jaremcze	$\widehat{A}^1 F^r (\geqslant 40^m)^9$	65^m	$19\frac{06}{08}$	Walnut Lane	$\widehat{A}^1\widehat{A}^1 r^{te} (\geqslant 40^m)^2$	71^{m}02
$18\frac{93}{94}$	Jamna	$\widehat{A}^1 F^r (\geqslant 40^m)^{10}$	48^m	$19\frac{07}{09}$	Wiesen	$E^1_h f^r (\geqslant 40^m)^1$	55^m
$18\frac{93}{94}$	Worochta	$\widehat{A}^1 F^r (\geqslant 40^m)^{11}$	40^m	$19\frac{08}{09}$	Montanges	$\widehat{A}^1 r^{te} (\geqslant 40^m)^{12}$	80^{m}29
$19\frac{01}{02}$	Solis	$C^1 f^r (\geqslant 40^m)^1$	42^m	$19\frac{08}{10}$	Lusserat	$\widehat{A}^1 F^r (\geqslant 40^m)^{22}$	45^m
$\frac{1899}{1903}$	Luxembourg	$\widehat{A}^1\widehat{A}^1 r^{te} (\geqslant 40^m)^1$	84^{m}65	$19\frac{08}{10}$	Rocky-River	$\widehat{A}^1\widehat{A}^1 r^{te} (\geqslant 40^m)^3$	85^{m}34
$19\frac{01}{05}$	Valence	$E^n r^{te} (\geqslant 40^m)^6$	49^{m}20	$19\frac{08}{12}$	Sidi-Rached	$\widehat{A}^1\widehat{A}^1 r^{te} (\geqslant 40^m)^4$	68^{m}76
$19\frac{03}{05}$	Plauen	$\widehat{A}^1 r^{te} (\geqslant 40^m)^{10}$	90^m	$19\frac{07}{09}$	Lichtensteig	$\widehat{A}^1 F^r (\geqslant 40^m)^{24}$	42^{m}82
$19\frac{04}{07}$	Amidonniers	$E^n E^n r^{te} (\geqslant 40^m)^1$	46^m, — 42^m, 38^{m}50	$19\frac{10}{12}$	Krummenau	$\widehat{A}^1 F^r (\geqslant 40^m)^{25}$	63^{m}26
$19\frac{04}{06}$	Salcano	$\widehat{A}^1 F^r (\geqslant 40^m)^{19}$	85^m	$19\frac{10}{12}$	Cinuskel	$\widehat{A}^1 f^r (\geqslant 40^m)^3$	46^{m}976
1906	Guggersbach	$\widehat{A}^1 r^{te} (\geqslant 40^m)^{11}$	50^{m}20	$19\frac{11}{12}$	Tuoi	$\widehat{A}^1 f^r (\geqslant 40^m)^4$	47^{m}706

54. — Ligne du lac de Constance au lac de Zurich : Viaduc sur la Sitter (Arches d'accès de 25^m de portée, poussant contre une pile-culée de 87^m de hauteur, épaisse en haut de 7^{m}70, 1908-1910) ; — Viaduc de Weissenbach (63^m de hauteur, 3^{m}50 seulement d'épaisseur aux naissances, 1908-1910).

Bodensee-Toggenburg-Zurichsee, — Saint-Gall, chez Zollikofer. 1911.

Tout compte fait, acceptons-la donc, non parce qu'elle est vraie, mais parce que des voûtes minces, ainsi calculées, tiennent.

Mais ne l'acceptons que très provisoirement, « *sous bénéfice d'inventaire « expérimental* »[55], c'est-à-dire jusqu'à ce que de nouveaux essais établissent d'autres formules qui s'ajustent mieux aux faits.

55. — Expression de Claude Bernard.

« *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* », 113.

ANNEXE

VOÛTES INARTICULÉES

ÉPAISSEUR A LA CLEF

COEFFICIENT :

$$\alpha = \frac{e_0 \text{ (épaisseur à la clef)}}{\left[1 + \sqrt{2a \text{ (portée)}}\right] \mu \text{ (fonction du surbaissement } \sigma\text{)}}$$

$$\mu = \begin{cases} \textit{Pleins Cintres } \mathbf{C} \ldots\ldots\ldots\ldots\ 1 \\ \textit{Ellipses (ou Anses de panier) } \mathbf{E} \ldots\ldots\ \dfrac{4}{3 + 2\sigma} \\ \textit{Arcs } \mathbf{A} \ldots\ldots\ \dfrac{4}{3}(1 - \sigma + \sigma^2) \end{cases}$$

VALEUR DE α POUR 562 OUVRAGES

ENVIRON 3 300 VOÛTES *(TYPES NON COMPTÉS)*

VOIR :

POUR LES VOÛTES $\geqslant 40^m$:

Pleins Cintres **C**, *Ellipses (ou Anses de panier)* **E** . . . . . Tome I

Arcs peu surbaissés $\left(\sigma \geqslant \frac{1}{2\sqrt{3}}\right)$ $\widehat{\mathbf{A}}$ . . . . Tome II

Arcs assez surbaissés $\left(\frac{1}{2\sqrt{3}} > \sigma \geqslant \frac{1}{7}\right)$ $\widehat{\mathbf{A}}$ } . . . . Tome III

Arcs très surbaissés $\left(\sigma < \frac{1}{7}\right)$ $\bar{\mathbf{A}}$ . . . . . . }

POUR LES VIADUCS : APPENDICE, – Viaducs . . . . Tome V

On a seulement indiqué les matériaux du queutage et le mortier (Ch = Chaux, Cim = Ciment).
Pour le sens des abréviations MOV, MEV, MAV, PT, L, Br, B, voir Tome III, Avertissement, p. 2, n° 6.
L'ex posant C^3, C^4 indique le nombre d'arches.

Coefficient $\alpha = \dfrac{e_o \text{ (épaisseur à la clef)}}{\left[1 + \sqrt{2a \text{ (portée)}}\right] \mu \left(\text{fonction du surbaissement } \sigma\right)}$

α	PONTS SOUS ROUTE						PONTS SOUS CHEMIN DE FER — VOIE NORMALE					VOIE ÉTROITE
	C	E	Â	Â	Ā	+D 2 anx	C	E	Â	Â	Ā	
0.09												
0.095					*Allemagne*, 1905-08, A^1 – MOV – cim : Ziegenhals, 40^m ; Michelau, 42^m ; Schwusen, 48^m; Kupferhammer, 48^m.							
0.10					Gross-Kunzendorf, *Allemagne*, A^3, arche centrale 40^m, MOV – cim.							
0.105	Viaduc de Chastellux, *Yonne*, 1876-78, C^{11} – 9^{m}50, MOV – cim.				Passages supérieurs, A^1, B – cim : *Limoges-Brive*, 1874-75 ,15^m; *Nantes-Chateaubriant*, 1875-77, 15^m. Neuhammer, *Allemagne*. Projet : 1905, A^1 – 52^m, MOV – cim. Longuich, *Allemagne*, 1909-11, A^1 – 43^m, B – cim.							
0.11		Toulouse, 1542-1632, E^7 – Arche centrale : 34^m.		sur le Kelvin, à Glascow, *Ecosse*, 1834, A^2 – 27^{m}45. Seythenex, 1908-11, A^2 – 41^{m}19, PT – cim.	*Allemagne*, 1903 à 1908, 46^m, B – cim : Mehring, A^1; Schweich, A^3; Trittenheim, A^1.							
0.115				La Brague, *Alpes-Maritimes*, 1900, A^1 – 30^m.	Huzenbach, *Allemagne*, 1889, A^1 – 35^m, PT. Longuich, *Allemagne*, 1909-11, A^1 – Arche centrale : 46^m, B – cim.					Chemnitz *(Allemagne)*. *(Chemnitz-Wechselburg*, (Int^t loc.) 1901-02, A^1 – 45^m.		
0.12					Teinach, *Allemagne*, 1882, A^1 – 33^m, PT – cim. Boucicaut, 1888-90, A^1 – 40^m, MAV – cim. Iguerande, 1895, A^2 – 28^{m}60, MOV – cim. Avignon, 1905-09, A$^{1''}$ – 40^m, MAV – cim.							
0.125		*Paris*, E^1 : Bercy, 1863-64, 29^m. Tolbiac, 1879-82, 35^m.		Chester, *Pays de Galles*, 1833-34, A^1 – 60^{m}96 – ch. Guggersbach, *Suisse*. 1906, A^1 – 50^{m}20, B – cim.	*Allemagne*, 1904-05, MOV – cim : Wengern, A^1 – 50^m ; Krappitz, A^1 – Arche centrale : 50^m. Arciat, Saône-et-Loire, 1906, A^2 – 31^m, MOV – cim.						Etaples, *Amiens-Boulogne*, 1875, 14^m.	
0.13		des Echavannes, *Chalon-sur-Saône*, 1787, E^2 – 12^{m}99. *Paris*, E^3 – MOV : St-Michel, 1857, 17^{m}20 – cim. Louis-Philippe, 1860-62, Arche cent^{le}, 32^m.		Elvria, *Etats-Unis*, 1886, A^1 – 15^{m}72, L – cim. Plauen, *Saxe*, 1903-05, A^1 – 90^m, MOV – cim. Excideuil, *Nontron-Sarlat*, 1886-87, A^3 – 16^m, MOV – cim.	Passage supérieur, *Civray-Le Blanc*, 14^m.					Zeniebach *(Autriche)*, *Stanislau-Woronienka*, 1893-94, A^1 – 22^m, MOV – cim.		
0.135		Pont au Change, *Paris*, 1858-60, E^3 – 31^{m}60.			Concorde, *Paris*, 1787-91, A^1 – arches de rive, 25^{m}33, PT – ch. Passage sup^r, *Preuilly-Tournon-St-Martin*, 1883-86, A^1 – 16^{m}16, MOV.					Lagunes de Venise *(Italie)*, *Venise Viennee*, 1841-46, A^{210} – 10^m.		

α	PONTS SOUS ROUTE C	E	Â	Â	Ā	en deux anneaux	PONTS OU VIADUCS SOUS CHEMIN DE FER — VOIE NORMALE C	E	Â	Â	Ā	VOIE ÉTROITE
0.14		Pont de l'Arche, sur la Seine, 1855-56, E^9 – 30^m62. Point du Jour, *Paris*, 1863-65, E^3 Partie hors du viaduc du chemin de fer 30^m35, MOV – ch. des Andelys, *Eure*, 1872-73, E^1 – 34^m – cim. Verdun-s-le-Doubs, 1895-97, E^3 – 41^m et 38^m50, MEV – cim. Edouard VII, *Angleterre*, 1901-03, E^3 – 40^m54 – cim.	de Dunkeld, sur la Tay, *Angleterre*, 1808, A^1 – 27^m45.	des Orfèvres, *Florence*, XIVe siècle, A^3 – 28^m80. Montanges, *Ain*, 1908-1909, A^1 – 80^m29, L – cim.	Concorde, *Paris*, 1787-91, A^5 – 28^m26, PT – ch. Digoin, sur la Loire, A^9 – 26^m, MAV – cim. Lays, sur le Doubs, 1895, A^5 – 26^m, MEV – cim. Orléans, 1904-06, A^7 – 43^m85. MAV – cim.	Amidonniers, *Toulouse*, 1904-07, E^5 E – 46^m et 42^m, MEV – cim. Luxembourg, 1899-1903, A^1 A – 84^m65, MAV – cim.		Malagazaune, *Marvejols-Neussargues*, 1882, E^1 – 12^m – ch.			Bellows-Falls, *Etats-Unis*, 1899, 2 A^1 – 42^m672 – L – cim.	Viaduc de Lantosque, *Vallée de la Vésubie, ligne électrique*, C^3 – 22^m, MOV – cim.
0.145		Courcelles sur la Seine, 1870, E^1 – 33^m, MOV – cim.	Tongue and sur la Dee, *Angleterre*, 1806, A^1 – 35^m97.	Bellefield, *Etats-Unis*, 1896-97, A^1 – 45^m72, B – cim.	Concorde, *Paris*, 1787-91, A^1 – Arche centrale, 31^m18 PT – ch. Ile Verte, sur l'Isère, *Grenoble*, 1898, A^3 – 39^m20, 37^m.	Amidonniers, *Toulouse*, 1904-07, E^5 E – 38^m50, MEV – cim.		Mouleydier, *Bergerac - Le Buisson*, 1877-79, E^1 – 10^m20.		Pont sur la Strona (*Italie*), *Domodossola-Iselle*, 1901-04, A^3 – 15^m, Br – ch.		*Ligne électrique de la Bernina*, 1909, Viaducs en C de 8^m. (Types) Cavagliasco, A^1 – 26^m.
0.15	Chambon, sur la Loire (*Haute-Loire*), 1895-97, C^1 – 28^m MOV.	Pont du Château, sur l'Allier, 1777, E^1 – 20^m70. Roanne, sur la Loire, 1789, E^7 – 23^m40. Vernon, sur la Seine, 1871-72, E^7 – 28^m. St-Pierre, 1886, E^1 – 40^m – cim. Edmondson-Avenue à Baltimore, *Etats-Unis*, 1908-09, E^1 – 42^m367, B – cim.		Wheeling, *Etats-Unis*, 1891-92, A^1 – 48^m46. St-Martin-Lys, *Quillan-Rivesaltes*, 1897, A^1 – 34^m, MAV – cim.	National, *Paris*, 1852-53, A^5 – 34^m50. Invalides, *Paris*, 1854, A^4 – arches de rive, 31^m87.		Viaducs : des Huttes, *Brioude–Alais*, C – 9^m24. sur la vallée de Pontone (*Italie*), *Gênes-Asti*, 1889-91, C^{25} – 12^m, Br – ch. de Lascoumères, *Lannemezan-Arreau*, 1892-93, C^5 – 7^m.				National, *Paris*, pont mixte rte et fr, 1852-53, A^3 – 34^m50.	
0.155		Gloucester, *Angleterre*, 1826-27, E^1 – 45^m72, PT. Notre-Dame, *Paris*, 1853-54, E^3 – 18^m76, MOV – cim. Vernon, sur la Seine, 1871-72, E^1 – 26^m – cim.		Argentat, sur la Dordogne, 1892-93, A^3 – 32^m64 – cim.	Nemours sur le Loing, 1796-1805, A^3 – 16^m24. Invalides, *Paris*, 1854, A^1 – arches centrales, 31^m69. Putney, *Angleterre*, 1882-83, A^5 – 43^m89, PT – cim. Charrey, sur la Saône, 1888, A^5 – 30^m, ch.	Constantine, *Algérie*, 1908-12, A^1 A – 67^m57, MA – cim.	sur le Sabato, (*Italie*) *Avellino-S.-Venere*, 1891-92, C^{16} – 11^m, Br – ch. de Baricave, *Lannemezan-Arreau*, 1893-94, C^2 – 10^m.			Pont sur le Toce (*Italie*), *Arona-Domodossola*, 1901-1904, A^6 – 25^m, Br – ch.	Roanne, 1858, A^1 – 28^m.	Ramounails, *Villefranche-Bourg-Madame*, 1906-08, A^1 – 40^m30, MEV – cim. Viaducs en C : de 10 à 20^m, *Ligne électrique de la Bernina*; de 8^m : *Ligne de l'Albula*. (Types).
0.16			Nyons, 1351-1407, A^1 – 40^m53.	Austerlitz, *Paris*, 1854, A^5 – 3 arches centrales, 32^m30. Claix, 1873-74, A^1 – 52^m, MOV – cim. Passage supérieur de Laveix, *Nontron-Sarlat*, 19^m35.	Tilsitt, *Lyon*, 1864, A^5 – 22^m84. Citadelle, *Grenoble*, 1865, A^3 – 23^m10.		de Bouchatel, *Brioude-Alais*, 9^m. de Saint-Denis, *Cahors-Brive*, 1881-87, C^7 – 8^m. du Vair, *Neufchateau-Barisey*, 1888, C^{10} – 11^m. sur le Rio Fraccio, (*Italie*), *Arona-Domodossola*, 1901-04, C^3 – 10^m, Br – ch.	La Flèche, sur le Loir, *La Flèche-La Suze*, 1875-76, E^3 – 20^m. Marmande, *Marmande-Casteljaloux*, 1880-83, Viaducs d'accès, E^{20} – 20^m. Val de la Loire, *Bourges-Gien*, 1887-92, Viaducs d'accès, E^{20} à 16^m, E^{15} à 15^m, E^{13} à 14^m, E^{10} à 13^m.		Jablonicabach (*Autriche*), *Stanislau-Woronienka*, 1893-94, A^1 – 25^m, MOV – cim. sur le torrent Cairasca, (*Italie*), *Domodossola-Iselle*, 1902, A^1 – 32^m, Br – ch. sur le Cervo (*Italie*), *Santhia-Arona*, 1901-05, A^5 – 18^m, Br – ch.	Pont sur la Louette, *Etampes-Pithiviers*, 1902, A^1 – 12^m.	Viaduc de Malvan, *Alpes-Maritimes*, C^6 – 22^m, MOV – cim. Passage infr, *Guingamp-Paimpol*, 1896, A^1 – 10^m97. Viaducs en C de 25^m, *Bernina*; de 6^m et 20^m, *Albula*. (Types).

Coefficient $\alpha = \dfrac{e_0 \text{ (épaisseur à la clef)}}{\left[1 + \sqrt{2a \text{ (portée)}}\right] \mu \text{ (fonction du surbaissement)}}$

α	PONTS SOUS ROUTE C	E	Â	Â	Ā	en 2 arcs	PONTS OU VIADUCS SOUS CHEMIN DE FER — VOIE NORMALE — C	E	Â	Â	Ā	VOIE ÉTROITE
0.165		Moulins, 1756-64, E^{13} – 19m50. Chatellerault, 1848, E – 20m. Bléré, sur le Cher, 1898-99, E^{8} – 24m – ch Empereur-François, *Prague*, 1899-1901, E^{1}. Plus grande arche : 42m34. PT – cim.			Mosca, à Turin, 1834, A^{1} – 45m, PT – ch.		Ballochmyle, *Ecosse*, 1846-48, C^{1} – 55m17. St-Waast, *Montauban-Castres*, 1884-86, C – 20m. Br – ch. Amélie-les-Bains, *Elne-Arles-sur-Tech*, 1890-92, C^{3} – 26m. Viaducs de : La Lavade, *Rodez-Millau*, 1880, C^{1} – 7m, MOV – ch. Maison Rouge, *Marvejols-Neussargues*, 1881-83, C^{1} – 15m, MEV – ch. Rio Cammarelle, *(Italie)*, *Sparanise-Gaeta*, 1890-91, C^{8} – 15m, Br – ch. la Selle, *Cie du Nord*, C – 15m – ch. Vallée d'Avella, *(Italie)*, *Avellino-S. Venere*, 1893-95, C^{5} – 15m, Br – ch. *Lac de Constance-Lac de Zurich*, *(Suisse)*, 1907-09, Weissenbach, C – 25m et C – 15m, MOV – cim. Viaducs de 15m, 20m, 22m, 25m (Types).	Pont sur la Bidassoa, *Bayonne-Irun*, E – 20m. Albias, *Montauban-Cahors* 1881-82, E^{3} – 23m25 – cim. Grand-Vicq, *Preuilly-Tournon Saint-Martin*, 1883-86, E^{1} – 16m. Caoue, *Lannemezan-Arreau*, 1891-93, E^{2} – 26m, MOV – ch. Verdon, *St-André-Puget-Théniers*, 1900-1902, E^{1} – 20m. Vendes, *Vendes-Mauriac*, 1900-1902, E^{1} – 16m. Vt de l'Eure, *Paris-Chartres*, E^{1} – 12m76.	Castelet, 1882-83, A^{1} – 41m20, MEV – cim	*Arona-Domodossola*, *(Italie)*, 1901-1904, Br – ch : Pont sur le torrent Selvaspessa, A^{3} – 25m. Pont sur le lac de Mergozzo, A^{1} – 25m. — id. — A^{2} – 25m.	Trilport, *Trilport-la-Ferté*, 1893, A – 26m86.	Viaducs en … de 15 à 25m *Albula*, *(Suisse)* (Types…
0.17	Vieux pont de Céret, 1321-39, C^{1} – 45m45. Brent, *Suisse*, 1899-1900, C^{1} – 44m, ME – cim.	Londres, 1824-31, E^{5} – 46m33. PT. Grenoble, 1839, E^{3} – 27m. Alma, *Paris*, 1854-55, E^{3} – arche centrale de 43m38. MOV – cim. Valence, 1901-05, E^{1} – 49m20. ME – cim.	Vieux pont de Claix, 1608-11, A^{1} – 45m65.	Quimper, *Ch. de fer de Chateaulin*, 1863, 21m54. des Auques, *Montauban-Brive*, 1881-82, A^{1} – 23m	Petit pont, *Paris*, 1852-53, A^{1} – 31m75. de la Citadelle, *Grenoble*, 1865, A^{3} – 25m04.	Rocky-River, *États-Unis*, 1908-10, A^{1} A^{1} – 85m34. B. et grosses pierres – cim.	Viaducs de : *St-Rambert-Grenoble*, 1855, la Fure, C^{16} – 14m. *Brioude-Alais*, Chamborigaud, C – 14m; Langogne, C – 14m. *Alais-Le Pouzin*, MOV – ch. : Frayol, C^{11} – 10m; Truel, C^{6} – 8m, Téoulemale, C – 12m; l'Auzon, C – 12m. *Limoges-Brive*, 1875, la Meyze, C^{3} – 18m; la Hte-Vézère, C^{3} – 10m. *Eymoutiers-Meymac*, Martin-Roche, C^{12} – 10m – ch. *Marvejols-Neussargues*, 1881-84, ch : MOV – 8m : Chapchiniès, C; Maison-Rouge, C; Triboulin, C; 10m : Le Lignon, C; Rimeize, C; Saillant, C^{3}; 12m : Massalès, C; MEV – 10m : La Combe, C^{3}; Le Blaud, C; Varillette, C. *Cahors-Brive*, 1882-85, 10m, MOV – ch : Les Marjaudes, C^{11}; Présignac, C^{12}; Sorbier, C. *Civray-Le Blanc*, Le Salleron, 1882, C^{2} – 10m. *Poitiers-Le Blanc*, La Caronnière, 1882-83, C^{7} – 10m. *Nontron-Sarlat*, 1885-87, ch : Nontron, C – 18m; St-Pardoux, C^{1} – 17m94, MOV; Muratel, 1893-95, C^{1} – 23m; Puyredon, C – 8m15. *Bourges-Gien*, Val de la Loire, 1887-92, rive dr., C^{18} – 16m, rive g. C – 16m. *Argenteuil-Mantes*, Triel, 1888-90, C – 5m10, C^{1} – 8m. *Issoudun-St-Florent*, 1890-93 : Bief du moulin de Charost, C^{3} – 12m; sur l'Arnon, C^{3} – 11m94, MOV – ch. *Mende-La Bastide*, 1896, Mirandol, C^{10} – 12m, MOV *Rome-Viterbe*, *(Italie)*, Val d'Enfer, 1891, C^{13} – 14m. *Quillan-Rivesaltes*, 1897-98 : St-Georges, C – 16m; Mouillèro, C^{3} – 16m; Lapradelle, C^{12} – 12m. Pts d'Axat, C – 30m, MEV – ch; d'Aliès, id. *St-Girons-Foix*, Vernajoul, C – 14m, MOV – ch. *Nérac-Mont-de-Marsan*, Pt sur le St-Laurent, C^{1} – 18m, MEV – ch. *Arona-Domodossola*, *(Italie)*, Torrent de Tiasca, 1901-04, C – 10m, Br – ch. *Lac de Zurich-Lac de Constance*, *(Suisse)*, Viaducs de 6m, 8m, 10m, 12m, 30m (Types).	Le Midou, *Nérac-Mont-de-Marsan*, 1892, E^{1} – 20m, MOV – ch. Dropt, *La Sauce-Eymet*, 1893, E^{3} – 15m. Arrigas, *Tournemire-Le Vigan*, 1895, E^{1} – 21m60. Arche elliptique du viaduc de l'Eure, *Paris-Chartres*, E^{1} – 25m80.	Victoria, *(Angleterre)*, *Durham-Junction Ry*, 1836-38, A^{1} – 48m77. Pont sur la Gelise, 13m. Pont sur le Tâtre, *Barbezieux-St-Mariens*, 1904, 28m91. Escot, *Oloron-Bedous*, 1907-09, A^{1} – 56m, MEV – cim.	Rouzeix, *Limoges-Brive*, 1875, A^{1} – 19m. Pont sur la Dordogne, *Laqueuille-Mont-Dore*, 1897, A^{1} – 28m, MOV – ch. Canale *(Autriche)*, *Assling-Trieste*, 1904-06, A^{1} – 40m. L – cim. Lusserat, *St-Jean-d'Angély-Saujon*, 1908-10, A^{1} – 45m70. MOV – cim.		*Morlai…* *Carhaix*, 1893, 2 C – 1… sur l… Dourca…, 1893, A – 15m… *Guingam…* *Paimpol*, 1896, C – 10m, 1… *Carhaix-Rospord…*, 1897, 2 C – 10… sur le Launay, 1897, C – 10m *Albula* *(Suisse)* Viaducs … de 10m, 1… 30m, (Types…

α	PONTS SOUS ROUTE C	E	$\widehat{A}$	$\widehat{A}$	$\bar{A}$	$\frac{60}{2}$ 300x	PONTS OU VIADUCS SOUS CHEMIN DE FER — VOIE NORMALE — C	E	$\widehat{A}$	$\widehat{A}$	$\bar{A}$	VOIE ÉTROITE
0.175		Alma, *Paris*, 1854-56, E^3, Arches de rive : 38^m50.		Dean, *Ecosse*, 1831, $A^3 - 29^m$. Passage sup^r de la Bachellerie, *Limoges-Brive*, 1875, $A^1 - 28^m$, B – cim. Cazeneuve, 28^m.			Oloron, 1881-1882, $C^1 - 40^m$, MOV – ch. cim. : Rébuzo, 1898-1900, $C^1 - 40^m$, MEV – cim. Viaducs de : *Argenteuil-Mantes*, Triel, 1888-90, $C^1 - 9^m$ – ch *Nontron-Sarlat*, St-Germain-des-Prés, 1890-92, $C^9 - 15^m$ – ch. *Bourges-Cosne*, St-Satur, 1891-93, $C^{26} - 13^m$ – ch. *Mende-La Bastide*, Mirandol, 1896, $C^8 - 6^m$, MOV. *Espalion-Bertholène*, 1903-05, MEV – ch : Le Plô, $C^1 - 17^m$; Le Goulal, $C^2 - 12^m50$. *Briey-Hussigny*, Thil, 1906, $C - 6^m90$. *St-André-Puget-Théniers*, 1905-12 : Le Maouna, $C^9 - 15^m$, MEV – ch ; la Donne, $C^5 - 17^m$; la Beïte, $C^1 - 34^m$ – ch ; l'Etroit, $C^1 - 15^m$, MEV ; Guillaumasse, $C^5 - 15^m$, MEV – ch. *Argenton-La Châtre*, La Vauvre, $C^1 - 15^m$. *St-Jean d'Angély-Saujon*, La Boutonne, 1906-07, $C^2 - 9^m$; Fontcouverte, $C^2 - 9^m$.	*Bergerac-Le Buisson*, 1876-79, $E^2 - 24$ – cim : Tremolat ; Alles ; Limeuil. *Marmande-Casteljaloux*, Marmande, 1877-81, $E^2 - 36^m$, MOV – ch. *Mende-Le Monastier*, Riencros, 1879, $E^1 - 21^m90$. *Civray-Le Blanc*, 1881-86 : Salleron, $E^1 - 14^m$; sur l'Anglin, $E^3 - 25^m$. *Cahors-Capdenac*, 1882-84, St-Martin-Labouval, sur le Lot, $E^4 - 25^m$ – ch : Masseriès, $E^2 - 23^m10$ – ch. *Montauban-Cahors*, 1883 ; Montauban, $E^8 - 25^m$, MEV – cim. *Tournemire-Le Vigan*, Coudoulous, 1895, $E^3 - 14^m$. *Castelsarrasin-Beaumont*, Belleperche, sur la Garonne, 1895-1900, $E^2 - 33^m$, Br – ch. sur la Big-Muddy, *Etats-Unis*, 1901-03, $E^3 - 42^m67$, B – cim.	Antoinette, *Montauban-Castres*, 1883-84, $A^1 - 47^m396$ aux retombées de l'arc – MEV – cim.	Calcio, *Italie*, 1877-78. $A^1 - 42^m$. Pouch, 1890, $A^1 - 47^m85$, MEV – ch. Worochta, *Autriche*, 1893-94, $A^1 - 40^m$, MEV – cim. Diveria, *Italie*, 1901-02, $A^1 - 40^m$, Br – ch. Boïlefos, *Norvège*, 1908, $A^1 - 40^m$, PT – cim. Lichtensteig, *Suisse*, 1910-1912, $A^1 - 42^m82$, MEV – cim. Passage inf. *Etampes-Pithiviers*, $A^1 - 16^m63$.	Pont sur la Corrèze, *Limoges-Brive*, 1875, $A^3 - 10^m$.	
0.18				Passage sup^r d'Eyrissou, *Nontron-Sarlat*, 1894, $A^1 - 19^m46$.	Corneille, *Rouen*, 1810-35, A^6 – arches centrales, 31^m. Archevêché, *Paris*, 1828, A^3 – arche centrale, 17^m00.		Viaducs de : *Nantes - Brest*, 1860-1867, Auray, $C^{10} - 15^m$; Guily-Glas, dit aussi de Port-Launay, $C^{12} - 22^m$ – MOV. *Arvant au Lot*, 1866-67, 8^m : Veyrière, C^2 ; Saguissoule, C^4. *Alais-Le Pouzin* : sur l'Ardèche, $C^{11} - 16^m40$. *Rodez-Millau*, 1873-77, MOV : Vezouillac, $C^7 - 16^m$ – cim ; Les Terrals, $C^{11} - 12^m$. *Marvejols-Neussargues*, Senouard, 1879-82, $C^9 - 18^m$ – MEV-ch. *Queroy-Nontron*, Le Bandiat, 1882-83 $C^6 - 10^m$ – ch. *Aurillac-St-Denis*, 1883-84 : 12^m : la Cère, C^7 – ch ; l'Auze, C^6. *Montauban-Brive*, 1882-86, ch. : Lamouroux, $C^9 - 10^m$; Planche-Torte, $C^{15} - 10^m$; Lignyroux, $C^8 - 9^m90$. *Argenteuil-Mantes*, 1888-90, ch, C^3 : Meulan, 18^m70 ; Bas Vals, 20^m. *Bourges-Cosne*, 1890-93, 10^m : Thauvenay, C^8 ; Ménétréol, C^{15} – ch. *Avellino-S. Venere*, *Italie*, Pt biais sur le Calore, 1889-93, $C^5 - 12^m$ – Br – ch. *Gênes-Asti*, *Italie*, 1891-92, 12^m – Br – ch : Pt biais sur la Stura, C^2 ; Pt sur la Bormida, C^{15}. *Carmaux-Rodez*, 1892-95, $C^7 - 10^m$: Ledas, ch ; la Mouline, MEV. *Nantes-Châteaulin*, Daoulas, $C^{15} - 18^m$. *Nontron-Sarlat*, 1893-95 : Moulin-Neuf, $C^6 - 10^m$ – ch ; Muratel, $C^6 - 8^m$. *Tournemire-Le Vigan*, Trèmouls, 1895, $C^3 - 7^m$. *Civray-Le Blanc*, 1881-86 : 8^m : Les Bourbes, C^5 ; chez Dinette, C^7. *Argenton-La Châtre*, 1896-99, Fromental, $C^5 - 10^m$ – ch. *Etampes-Pithiviers*, 1902-03, Passage inf. sur ch v^al No 5, $C^1 - 16^m$. *Lozanne-Givors*, 1903, Colombier, $C^2 - 10^m$ – (2 voûtes d'accès) MOV – ch. *Guèret-La Châtre*, 1901-05, 10^m – ch : la Petite Creuse, $C^{16} - 10^m$; la Creuse, $C^{16} - 10^m$; Glâne, C^{12} – MOV. *Bort-Neussargues*, 1903, Salsignac, $C^{14} - 10^m$, MOV – ch. *Anduze-St-Jean-du-Gard*, 1905-09, 8^m, MOV – ch. : St-Michel, C^3 ; Vallat des Doucettes, C^5 ; Vallat de Boissceson, C^3. *Argent-Beaune-la-Rolande*, 1902-1903 ; la Vallée Parrin, $C^7 - 10^m$ – MEV – ch. *Espalion-Bertholène*, 1904, Labaume, $C^8 - 14^m$ MEV – ch. *Mateur-Nebeur, (Tunisie)*, 1908, Oued-Beja, $C^{12} - 21^m$. *Morez-St-Claude*, 1909-11, Valfin, $C^6 - 10^m$, MOV – ch. *Paris-Chartres*, la Remarde, $C^5 - 10^m$ – MOV – ch. *Langogne-Le Puy*, 1905-1907, la Bargeasse, $C^6 - 10^m$, MOV – ch. *Moûtiers-Bourg-Saint-Maurice*, 1912, Les Plaines, $C^1 - 10^m$ (arches d'accès), MOV – ch. *St-André-Puget-Théniers*, 1912 : La Beïte, $C^4 - 10^m$, ch Le Gros-Vallon, $C^3 - 14^m$; Fontbouisse, $C^5 - 14^m$, MEV – ch.	Chalonnes, 1863-65, $E^{15} - 30^m$. Nantes, *Nantes-La Roche-sur-Yon*, 1863-65, $E^9 - E^2 - 30^m$. St-Pierre de Gaubert, sur la Garonne, *Agen-Tarbes*, 1868, $E^{15} - 21^m65$, ch. Mauzac, sur la Dordogne, *Bergerac – Le Buisson*, 1877, $E^2 - 30^m$, cim. Verdon, 1905-06, $E^1 - 40^m$, MEV – cim.		Freyssinet, 1890-91, $A^1 - 15^m$, MEV – cim. Svenkerud, *Norvège*, 1905-07, $A^1 - 44^m$, PT – cim. Pont sur le Vallat de Boisseson, *Anduze-St-Jean-du-Gard*, 1905-09, $A^1 - 25^m$. MOV – ch. Krummenau, *Suisse*, 1910-1912, $A^1 - 63^m26$, L – cim.	Sauvebœuf, sur la Vézère, *Nontron-Sarlat*, 1892-93, $A^3 - 24^m$, MOV – cim. Pont sur le Don, *Nantes-Châteaubriant*, 1875, $A^1 - 17^m$.	Passage inf^r. de la R^te N^le No 12, *Morlaix-Carhaix*, 1893, $A^1 - 19^m70$. Viaduc sur le Ster Laër, *Carhaix-Rosporden*, 1897 $A - 8^m$. Viaduc sur l'Aulne, *Carhaix-Châteaulin*, 1909, $C^5 - 20^m50$. *Florac-Ste-Cécile-d'Andorge*, Viaducs de 12^m : sur le ruisseau de Servières, C^1. sur le Transgardon, C^2. sur le Timbasses, C. sur la Mimente, C^3. Pont sur la Gravona, 1884. $A^1 - 43^m53$.

Coefficient $\alpha = \dfrac{e_o \text{ (épaisseur à la clef)}}{\left[1 + \sqrt{2a} \text{ (portée)}\right] \mu \left(\text{fonction du surbaissement } b\right)}$

α	PONTS SOUS ROUTE						PONTS OU VIADUCS SOUS CHEMIN DE FER — VOIE NORMALE					VOIE ÉTROITE
	C	E	Â	Â	Ā	en 2 ann^{x}	C	E	Â	Â	Ā	
0.185		Carbonne, sur la Garonne, 1764-80, F^{3} – 31^{m}20. Sault du Rhône, 1827, 34^{m} Lanne, sur l'Adour, 1876. E^{7} – 24^{m}, MOV – cim. St-Jean, sur l'Adour, à Saubusse, 1880-82, E^{7} – 24^{m}, MOV – ch.			l'Archevêché, *Paris*, 1828, A^{1} – Arches de rive, 15^{m}.		Viaducs de : *Tours-Bordeaux*, 1846-48, la Manse, C – 15^{m}. *St-Denis-Creil*, 1856-58, Comelle, C – 19^{m}. *Arvant au Lot*, 1866-67, Neyrevèze, C^{3} – 15^{m}. *Limoges-Brive*, 1872-75, ch, 20^{m} : Vignols, C^{10}; La Sagne, C ; Le Sarget, C. *Limoges-Brive, par Uzerche*, 1885-90 : Limoges, C^{21} – 15^{m}. *Bourg-La Cluse*, 1872-75, Cize-Bolozon, sur l'Ain, C^{11} – 20^{m}. *La Flèche-Sablé*, 1875-77, la Sarthe, C^{11} – 20^{m}. *Rodez-Millau*, 1873-77, Aguessac, C^{15} – 11^{m}4, MOV. *Eymoutiers-Meymac*, Les Farges, C^{11} – 15^{m} – ch. *St-Denis-Souillac*, 1880-84, ch: les Courtils, C^{7} – 15^{m}; Bramefond, C^{15} – 17^{m}. *Port-de-Piles-Preuilly*, 1882-83, Nambon, C^{5} – 20^{m}. *Poitiers-Le Blanc*, 1881-85, Le Blanc, C^{21} – 20^{m}, ch. *Montauban-Brive*, 1883-88, Lamothe, C – 15^{m}, ch *Vendes-Mauriac*, 1888, Labiou, C^{10} – 9^{m}. *Argenteuil-Mantes*, 1888-90, Maurecourt, C^{3} – 11^{m}. *Issoudun-St-Florent*, 1889-93, St-Florent, C^{15} – 30^{m}, MOV – ch. *Tournemire-Le Vigan*, 1889-96, MEV: Rieusset, C^{6} – 13^{m}; Aumessas, C^{11} – 15^{m}. *Bourges-Cosne*, 1891-92, Les Moultonneaux, C^{3} – 8^{m}50. *Carmaux-Rodez*, 1894-95, Auterne, C^{1} – 15^{m}; Moulines, arche centrale : 17^{m}, MEV – ch. *Nontron-Sarlat*, 1894-95, L'Enéa, C^{7} – 20^{m}, ch. *Argenton-La Châtre*, 1897-1901, L'Auzon, C^{20} – 20^{m}. *Espalion-Bertholène*, 1903-1904, MEV – ch, 11^{m}: les Conquettes, C^{12}; la Loubière, C^{7}. *Briey-Villerupt*, 1905, Brabant, C^{10} – 15^{m}. *St-Jean-d'Angély-Saujon*, 1905-1909, La Thonne, C^{7} – 11^{m}. *Miramas-L'Estaque*, 1911-12, La Corbière, C^{6} – 6^{m}50, MOV – ch. *Paris-Chartres*, L'Eure, C^{1} – 20^{m}, C^{8} – 9^{m}50, MOV – cim.	Orléans, *Orléans-Vierzon*, 1843-1846, E^{11} – 24^{m}20. Port-de-Piles, *Tours-Poitiers*, 1846. E^{3} – 31^{m}. Barbentane, sur la Durance, 1847-49, E^{21} – 20^{m}. Port-Ste-Marie, *Condom-Port-Ste-Marie*, E^{3} – 32^{m}.	Lavaur, 1882-84, A – 61^{m}50, MEV – cim. Rothwein-bach, *Autriche*, 1904-06, A^{1} – 41^{m}, MOV – cim.	P^{t} biais sur le torrent de Caramagna, *Gênes-Asti, (Italie)*, 1890-91, A^{1} – 18^{m}10. Condat, *Nontron-Sarlat*, 1893-95, A^{1} – 15^{m}15, MOV – ch.		Viaducs sur l'Isole, *Carhaix-Rospord[en]* 1893, A – 21^{m}… sur l'Hyeres *Morlaix-Carha[ix]* 1893, A – 22^{m}34 *Guingamp-Paimpol*, 18… du Trieux, E^{2} – 24^{m}. Passage inféri[eur] A – 12^{m}1… Solis (*Sui[sse]*) *Albula*, 1901-… C^{1} – 42, MOV – cim sur l'Oust *Loudéac-Carha[ix]* 1904, A – 1…^{m} *Florac-Ste-Cec[ile] d'Andorge* sur le Transgar[d] C – 20^{m}; sur le Timbas[s] C – 20^{m} de Triège (*Sui[sse]*) *Chatelard-Martigny*, A^{1} – 35^{m}4…
0.19	St-Romain, sur la Vienne, 1857, C^{5} – 18^{m}. *Route de Saint Romain à Dangé.*	Waterloo, *Londres*, 1817, E^{9} – 36^{m}60.		Pont sur la Meuse, en aval de Mézières, 14^{m}94.	Fouchard, *Saumur*, 1774-82, A^{1} – 26^{m}. Iéna, *Paris*, 1807-14, A^{1} – 28^{m}.	Walnut-Lane, *Philadelphie, Etats-Unis*, 1906-08, A^{1} A^{1} – 70^{m}71, B et grosses pierres – cim.	Viaducs de : *Nantes-Chateaulin*, 1860-62, Hennebont, C^{6} – 10^{m}, C – 22^{m}, ch. *Arvant au Lot*, 1866-67 : Elbarat, C^{9} – 10^{m}; Antérieux, C – 12^{m}; l'Aiguille, C^{3} – 14^{m}20, C^{1} – 28^{m}. *Rodez-Millau*, 1873-77, Aguessac, C^{1} – 18^{m}50, MEV. *Séverac-Marvejols*, 1877-79 : St-Laurent-d'Olt, C^{9} – 20^{m}; ch; le Piou, C^{6} – 20^{m}, MEV. *Marvejols-Neussargues*, 1879-82, 20^{m}, ch: Chanteperdrix, C^{9} – MEV; Merdarie, C^{2} – MOV *Cahors-Brive*, 1881-89, Calamane, C – 9^{m}96, MOV – ch. *Montauban-Brive*, 1882, Les Sept-Fonts, C^{3} – 10^{m}. *Tournemire-Le Vigan*, 1886-92, Les Cayrelets, C – 12^{m}50, MOV. *Vendes-Mauriac*, 1888, 10^{m} : Jalevrac, C^{7}; Chabrespine, C^{7}; Druilhes, C^{6}. *Argenteuil-Mantes*, 1888-90, ch: G^{d} Ravin de la Frette, C^{7} – 10^{m}; P^{t} Ravin de la Frette, C^{1} – 7^{m}. *Stanislau-Woronienka (Autriche)*, 1893-94, Worochta, C^{1} – 34^{m}60, MOV – cim. *Mende-Séverac*, Tarnesque, C^{9} – 9^{m}, ch *Bort-Neussargues*, 1903-05, Barajol, C^{12} – 20^{m}, MOV *Paris-Chartres*, MOV – cim, 14^{m}15 : Oisème, C^{16}; l'Eure, C.	*Poitiers-Le Blanc*, 1881-84, 24^{m}: Chauvigny, E; St-Savin, E^{3}. Hocmard, *Nantes-Chateaubriant*, 1886, E^{3} – 30^{m} – cim. Mantes, *Argenteuil-Mantes*, 1888-89, E^{5} – 32^{m} et 34^{m}, ch. Mareuil, *Cahors-Brive*, 1891, E^{7} – 23^{m}.	*Gien-Argent*, 1887-92, Passages inférieurs : A^{1} – 27^{m}08 et 25^{m}12. Villefranche de Conflent, sur la Tet, *Prades-Olette*, 1889-91, A^{1} – 39^{m}35.	Le Brézou, *Limoges-Brive*, 1887, A^{1} – 29^{m}20, MOV – cim. sur la Chalouette, *Etampes-Pithiviers*, A^{1} – 23^{m}25 Strandeelven, *Norvège*, 1902-04, A^{1} – 41^{m}, cim. Krenngraben, *Autriche*, 1904-05, A^{1} – 40^{m}. MOV – cim. Saleano, *Autriche*, 1904-06, A^{1} – 85^{m}. PT – cim. Langenbrand, *Bade*, 1907-09, A – 59^{m}. PT – cim. Grande-Roche, *Morez-St-Claude*, 1909-11, A^{7} – 10^{m}. MOV – ch La Croix, *Frasne-Vallorbe*, 1912, E^{2} – 20^{m}, MOV – cim		sur le canal [de] Nantes à Bre[st] *Carhaix-Rospord[en]* 1892, A – 1… *Guingamp-Paimpol*, 1896, P. 532^{k}421, … P. 532^{k}550, … *Florac-Ste Cé[cile] d'Andorge*, 25… Pont sur le Dourdon, C… Pont sur l'And[orge] C^{4}. *St Méen-Loud[éac]* 1904, 10^{m} Viaducs … sur le Daoulas, … sur le Poulan… C^{4}. *Bevers-Schul[s]* (*Suisse*), 19… A^{1}, MAV – ci[m] Cinuskel, 46^{m}… Tuoi, 47^{m}7…

$$\text{Coefficient } \alpha = \frac{e_0 \text{ (épaisseur à la clef)}}{\left[1+\sqrt{2a \text{ (portée)}}\right]\mu\left(\text{fonction du surbaissement } \sigma\right)}$$

α	PONTS SOUS ROUTE — C	E	Â	Â	Ā	en 2 ann^x	PONTS OU VIADUCS SOUS CHEMIN DE FER — VOIE NORMALE — C	E	Â	Â	Ā	VOIE ÉTROITE
0.195	Vieille-Brioude, 1824-31, $C^1 - 45^m$. St-Sauveur, 1860-61, $C^{[illegible]} - 42^m$, MOV – cim. Avenue du Connecticut, *Washington*, 1899-1908, $C^{[illegible]} - 45^m72$, B – cim.	Neuilly, 1768-74, $E^{[illegible]} - 39^m$, PT. Frouard, sur la Moselle, 1788, 19^m50. Cé, 1846-48, $E^{11} - 25^m$. Mantes, 1873-75, $E^3 - 40^m$, 36^m50. Came, sur la Bidouze, 35^m.	Abbaretz, *Nantes-Chateaubriant*, 1875, $A^1 - 22^m$, B – cim.	Vérone, *Italie*, 1354, $A^1 - 48^m73$. Bains de Lucques, *Italie*, 1845-77, $A^1 - 47^m85$, Br – ch.			Viaducs de : *Montluçon-Limoges*, 1862-64, 10^m : Crevant, C^{10}; Villatte, C^{10}; Lavaud-Franche, C^9. *Tournemire-Le Vigan*, 1886-92 : Ste-Eulalie, $C^8 - 15^m$, MEV; Lapanouse, $C^{11} - 15^m$, MEV; le Bassin, $C^7 - 17^m$. *Limoges-Brive*, 1887-91, St-Germain-les-Belles, $C^{13} - 17^m$, ch. *Largnac-Vendes*, 1888, Bassignac, $C^{[illegible]} - 11^m$. *Argenteuil-Mantes*, 1888-90, La Monteiant, $C^3 - 11^m50$, ch. *Guéret-La Châtre*, 1902-04, Vauvre, $C^{[illegible]} - 8^m$, ch. *St-Jean-d'Angély-Saujon*, 1906-07, Chaumet, $C^3 - 13^m$.	Bouchemaine, *Tours-Nantes*, 1846, $E^{[illegible]} - 24^m$. Plessis-lez-Tours, *Tours-Vendôme*, 1855-56, $E^{[illegible]} - 24^m$. sur l'Anglin, à Ingrandes, *Poitiers-Le Blanc*, 1885-87, $E^3 - 24^m$.	Schalchgraben, *Autriche*, 1904-05, $A^1 - 52^m$, PT – cim.	Blossac, à Poitiers, $A^1 - 14^m$. Pt de la Cèze, 16^m20. Schwändeholzdobel, *Bade*, 1899-1900, $A^1 - 57^m$, PT – cim. Steyrling, *Autriche*, 1904-05, $A^1 - 70^m$, PT – cim.		Viaducs : sur le Trieux, *Guingamp-Paimpol*, 1896, $C^{[illegible]} - 12^m80$.
0.200	Dinan, sur la Rance, 1846-52, $C^{10} - 16^m$.	Poissy, 1848-71-74, $E^{16} - 14^m92$.			Pontoise, 1772, 29^m26. Corneille, *Rouen*, 1810-35, A^6 – Arches de rive : 26^m.		*Eymoutiers-Meymac*, Légaud, $C^3 - 12^m$, ch. *Montauban-Brive*, 1881-83, Malminot, $C^{[illegible]} - 9^m$. *Mauriac, à la ligne d'Aurillac à St-Denis*, 1882, Les Agats, $C^9 - 12^m$. *Aurillac-St-Denis*, 1884-85, L'Authre, $C^5 - 16^m$. *Limoges-Brive*, 1887-91, Vigen, C^{10}-16^m, MOV – ch. *Gênes-Asti, (Italie)*, 1890-93, 18^m50, Br – ch. : sur les Torrents Chiaravagna, C^{10}; Cantalupo, C^6; de Varenna, C^9; Acquasanta, $C^{[illegible]}$. *Tournemire-Le Vigan*, 1890-95, 18^m, ch : Cailaret, C^9 – MEV; Valcrose, C^7 – MOV. *Carmaux-Rodez*, 1894-97, la Gascarie, $C^{12} - 20^m$, MEV – ch. *Lozanne-Givors*, 1903, 12^m, MOV – ch. : Crévy, C^3; la Chicotière, C^7; les Planches, C^7; les Armières, C^8; l'Iseron, $C^{[illegible]}$. *Anduze-St-Jean du Gard*, 1905-09, MOV – ch. : Mialet, $C^{10} - 12^m$; la Plaine, sur le Gardon, $C^7 - 12^m$; Vallat d'Amous, $C^6 - 11^m$. *Morez-St-Claude*, 1909-11, le Saillard, $C^{[illegible]}$: arches d'accès, 12^m, MOV – ch. *Miramas-l'Estaque*, 1912-14 : Les Eaux-Salées, $C^1 - 50^m$, MEV – cim.	Montlouis, *Blois-Tours*, 1843-46, $E^{12} - 24^m75$. Cinq-Mars, *Tours-Nantes*, 1846, $E^{19} - 20^m$.	Palmgraben, *Autriche*, 1904-05, $A^1 - 49^m$, MOV – cim. Leymarie, *Nontron-Sarlat*, 1893, $A^1 - 19^m45$, MOV – cim.	Jamna, *Autriche*, 1893-94, $A^1 - 48^m$, MAV – cim.		*Carhaix-Rosporden*, 1893-97, ch : sur le Kerminot, $C - 12^m$; sur le Troujoly, $C - 4^m$; sur le Stergoff, $C - 4^m$; Pt : 28^k250, $C^3 - 12^m$. *Lons-le-Saulnier-Saint-Claude* 1899. Revigny, $C^{[illegible]} - 12^m$. *Carhaix-Chateaulin*, 1907, $C - 12^m$.
0.205		Compiègne, 1733, $E^3 - 23^m40$. Poissy, 1848-71-74, $E^{16} - 17^m32$.	St-Étienne, *Autriche*, 1842-46, $A^1 - 43^m60$, MOV		Ste-Maxence, 1774-85, $A^1 - 23^m40$ Pesmes, sur l'Oignon, 1772, $A^1 - 13^m64$		*Paris-Mulhouse*, 1855-56, Nogent-sur-Marne : Arches d'accès, $C^{[illegible]}$. 15^m. *Rennes-Brest*, 1863-65 : Morlaix, $C^{[illegible]} - 15^m50$; le Guédic, $C^7 - 15^m$; le Gouet, $C^{12} - 15^m$ *Arvant au Lot*, 1866-67, 15^m : Lège, $C^{[illegible]}$; le Passadou, $C^{[illegible]}$. *Cahors-Brive*, 1882-88, 15^m, ch : le Boulet, C^{26}, MEV; Souillac, C^{30}, MOV. *Rome-Viterbe, (Italie)*, 1892-93, Vallée de Ronciglione, $C^7 - 18^m$. *Lozanne-Givors*, 1903 : Civrieux, $C^3 - 15^m$. *Langogne-Le Puy*, 1905-07, Arquejols, $C^{11} - 15^m$, MOV – ch. *Anduze-St-Jean du Gard*, 1905-09, 15^m, MOV – ch. : Le Mas du Pont, C^3; la Salindrique, $C^{[illegible]}$. *Miramas-L'Estaque*, 1911-13, 15^m, MOV – ch.: Le Jonquier (4 v^tes d'accès); l'Etable (2 v^tes d'accès); Le Grand-Vallat, C^8; Mauvallon, C^6; Les Loubatons, C^7; Les Riaux, C^8; Mejean, $C^{[illegible]}$; L'Aigle, $C^{[illegible]}$.	sur la Cère, 1884-85, *Aurillac-St-Denis*, 35^m.	Céret, 1883-85, $A^1 - 45^m$, L – cim.	Gutach, *Bade*, 1899-1900, $A^1 - 64^m$, PT – cim. Gour-Noir, *Limoges-Brive*, 1888-89, $A^1 - 60^m$, MEV – cim.		*Carhaix-Rosporden*, 1897, sur le Goaranvec, $C^1 - 7^m$. *Carhaix-Chateaulin*, 1909, sur l'Aulne, $C^{[illegible]} - 6^m$.
0.210	Albi, sur le Tarn, $C^{[illegible]} - 27^m60$.	Fium'Alto, *Corse*, 1862-63, $E^1 - 40^m$, MOV – ch. Annibal, *Italie*, 1868-70, $E^1 - 55^m$, Br et MOV ch – cim. Diable, *Italie*, 1871-72, $E^1 - 55^m$, Br. et MOV ch – cim.	Bordeaux, 1822, $A^{17} - 20^m85$ et 26^m49.				*Arvant au Lot*, 1866-67, La Gouyère, $C^3 - 10^m$. *Limoges-Brive*, 1873-75 : Pompadour, $C^8 - 25^m$, ch; Pt de la Corrèze, $C^3 - 14^m$. *Anduze-St-Jean du Gard*, 1905-09, MOV – ch.: St-Michel, $C^1 - 18^m$; Vallat d'Amous, $C^1 - 18^m$. *Nérac-Mont-de-Marsan*, Pt sur le Luddon, $C^1 - 22^m$.	Signac, *Montréjeau-Luchon*, 1871-72, $E^1 - 40^m$, PT, MOV cim, ch.				

Coefficient $\alpha = \dfrac{e_0 \text{ (épaisseur à la clef)}}{\left[1 + \sqrt{2a} \text{ (portée)}\right] \mu \left(\text{fonction du surbaissement}\right)}$

α	PONTS SOUS ROUTE: C	E	Â	Â	Ā	en 2 ann^x	PONTS OU VIADUCS SOUS CHEMIN DE FER — VOIE NORMALE: C	E	Â	Â	Ā	V. ÉTR.
0.215							Viaducs de : *Marvejols-Neussargues*, 1879-83, Crueize, C^6 – 25^m MEV – ch. *Quéroy-Nontron*, 1882-83, Le Bandiat, C^1. Arche centrale : 20^{m}50. *Vendes-Mauriac*, 1888 ; Méallet, C^1 – 15^m. *Lozanne-Givors*, 1903, Le Colombier, Arche centrale. 30^m, MOV – ch. *Briey-Villerupt*, 1906, Le Thil, C^5 – 25^m, MOV. *Morez-St-Claude*, 1909-11, Le Pain de Sucre, grande arche, 15^m, MOV – ch.	Viaduc sur le Vallat de Daudé, *Anduze-St-Jean-du-Gard*, 1905-09, E^1 – 22^m. MOV – ch.		Chambeuil, 1866, 23^{m}22. Jaremcze, *Autriche*, 1893-94, A^1 – 65^m, PT – cim.		
0.22		Saumur, 1756-64, E^{12} – 19^{m}50. Tours, 1765-77, E^{15} – 24^{m}36.					*Arvant au Lot*, 3 C^1 de 20^m aux P^{ts} 65^{k}3, 65^{k}436, 65^{k}5. *Lozanne-Givors*, 1903, Arche centrale, 20^m ; les Armières, l'Iseron, MOV – ch. *Morez-St-Claude*, 1909-11 : Morez, C^9 – 20^m MEV – ch. *Miramas-L'Estaque*, 1911-12, 20^m, MOV – ch. : Les Aragnols, C^3 ; la Corbière, C^7.		Berdoulet, *Ariège*, 1860-61, A^1 – 40^m, MOV – cim Wäldlitobel, *Autriche*, 1883-84, A^1 – 41^m, MOV – ch. cim.			
0.225	Ornaisons, 1745-52, C^1 – 42^{m}90.						*Paris-Mulhouse*, 1855-56, Nogent-sur-Marne, Grandes arches : C^1 – 50^m, MOV – cim.	Longueville-lez-Metz, 1854, E^8 – 20^{m}60.		Maretta, Prarolo, *Italie*, 1851-52, A^1 – 40^m, Br. Lège, 1867, 10^m.		
0.23			Nydeck, *Suisse*, 1840-44, A^1 – 45^{m}90, MEV – ch. cim.				*La Clayette-Lamure*, Le Sornin, 1898-1900, C^4 – 35^m, MOV – ch.					
0.235							*La Clayette-Lamure*, 1892-95, Mussy, C^{18} – 25^m, MOV – ch. *Morez-St-Claude*, 1909-11, Saillard, Arche centrale 25^m, MOV – ch. *Miramas-L'Estaque*, 1911-12, *L'Etable*, Arche centrale : 25^m, MOV – ch.					
0.24							*Bussière-Galant-St-Yrieix*, 1902, Pont sur l'Isle, C^1 – 20^m, MOV – ch. *Miramas-L'Estaque*, 1911-12, Le Jonquier, Arche centrale : 30^m, MOV – ch. *Moûtiers-Bourg-St-Maurice*, 1912, Les Plaines, Arche centrale : 30^m, MOV – ch					
0.245			Tournon, 1351-1583, A^1 – 49^{m}20. Crespano, *Italie*, 1832-36, A^1 – 40^m, Br.									
0.25												
0.255												
0.26	Collonges, 1869-73, C^1–40^m, PT, MOV – ch.											
0.265		Gignac, 1770-1810, E^1 – 48^{m}73, PT.										
0.27												
0.275												
0.28												
0.285		Vizille, 1751-66, E^1 – 41^{m}08, PT – ch.										
......												
0.35		Lavaur (Vieux P^t), 1773-91, E^1 – 48^{m}72, PT – ch.										

PONTS DÉCRITS DANS LE TOME III

INDEX ALPHABÉTIQUE

TABLE DES MATIÈRES

DU TOME III

1RE PARTIE. — VOÛTES INARTICULÉES *(Suite)*

LIVRE I. - DESCRIPTION DES PONTS QUI ONT OU AVAIENT DES VOÛTES INARTICULÉES DE 40^{m} ET PLUS DE PORTÉE. TABLEAUX SYNOPTIQUES. — MONOGRAPHIES.

(Suite)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ $\widehat{A}$

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\widehat{A}^{1}$ r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ $\widehat{\mathbf{A}}$

(Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\widehat{\mathbf{A}}^{1}\ \mathrm{r}^{te}\ (\geqslant 40^{m})$ *(Suite)*

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ $\widehat{A}$

(*Suite*)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\widehat{A}^1$ r^{te} (> 40m) (*Suite*)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ $\widehat{A}$

(Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\widehat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant$ 40m) *(Suite)*

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ Â

(Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE Â^1 r^{te} (≥ 40^m) *(Suite)*

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CONDUITE D'EAU (AQUEDUCS)

SÉRIE Â^1 aq (≥ 40^m)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ $\widehat{A}$

(Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\widehat{A}^1$ F^r ($\geqslant$ 40m)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ $\widehat{A}$

(Suite)

PONT A UNE SEULE GRANDE ARCHE
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\widehat{A}^1$ F^r ($\geqslant 40^m$) *(Suite)*

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ Â

(Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE Â¹ Fr (> 40m) (Suite)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ $\widehat{A}$

(Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\widehat{A}^1$ F^r ($\geqslant$ 40^m)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ Â

(Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE Â¹ Fr (⩾ 40m) *(Suite)*

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ $\widehat{A}$

(Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\widehat{A}^1$ F^r ($\geqslant 40^m$) *(Suite)*

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE $\widehat{A}^n$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ $\widehat{A}$

(Suite)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\widehat{A}^n$ F^r ($\geqslant$ 40m)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ $\bar{A}$

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\bar{A}^1$ R^{te} ($\geqslant$ 40m)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ Â
(Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE Â¹ rte (⩾ 40m) *(Suite)*

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ $\bar{\bar{A}}$

(Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CONDUITE D'EAU (AQUEDUCS)

SÉRIE $\bar{\bar{A}}^1$ aq ($\geqslant$ 40m)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\bar{\bar{A}}^1$ Fr ($\geqslant$ 40m)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE $\bar{\bar{A}}^n$ rte ($\geqslant$ 40m)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ $\overline{A}$

(Suite)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE $\overline{A}^n\ r^{te}$ ($\geqslant 40^m$) *(Suite)*

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ Ā

(Suite)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE $\bar{A}^n$ 1te (⩾ 40m) *(Suite)*

Pages.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ $\bar{A}$ *(Suite)*

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE $\bar{A}^n r^{te}$ ($\geqslant$ 40m) *(Suite)*

QUELQUES VOÛTES INARTICULÉES
QU'ON AURAIT, A TORT, CHERCHÉES AU LIVRE I

TITRE I. — VOÛTES INARTICULÉES ≥ 40m EN BÉTON PEU ARMÉ

QUELQUES VOÛTES INARTICULÉES

QU'ON AURAIT, A TORT, CHERCHÉES AU LIVRE I

(Suite)

TITRE II. — VOÛTES INARTICULÉES ⩾ 40ᵐ TOMBÉES PENDANT QU'ON LES CONSTRUISAIT

TITRE III. — VOÛTES INARTICULÉES AUXQUELLES ON A ATTRIBUÉ A TORT 40ᵐ DE PORTÉE OU PLUS

LIVRE II. — CE QUE L'EXPÉRIENCE ENSEIGNE DE SPÉCIAL AUX VOÛTES INARTICULÉES

TITRE I. — COMMENT ON TRACE UNE VOÛTE

TITRE I. — COMMENT ON TRACE UNE VOÛTE *(Suite)*

CHAPITRE III. — ÉPAISSEUR D'UNE VOÛTE

CHAPITRE IV — BANDEAUX

TITRE II. — COMMENT ON CALCULE LES EFFORTS DANS LES GRANDES VOÛTES HYPOTHÈSE ÉLASTIQUE

CHAPITRE I. — COMMENT ON DÉTERMINE, POUR UNE SECTION QUELCONQUE, L'EFFORT NORMAL ET LE COUPLE DE FLEXION

CHAPITRE II. — ON CONNAIT L'EFFORT TOTAL N SUR UNE SECTION, SA DISTANCE *u* AU CENTRE DE GRAVITÉ. COMMENT N SE DISTRIBUE-T-IL SUR LA SECTION ? EFFORTS PAR UNITÉ EN CHAQUE POINT.

TITRE III. — RELATION ENTRE LES CHARGES ET LA FORME DE LA VOÛTE

CHAPITRE I. — ON DOIT TRACER LA FIBRE MOYENNE DE FAÇON QUE LES COURBES DE PRESSION S'EN ÉCARTENT LE MOINS POSSIBLE

CHAPITRE II. — CAS D'UNE VOÛTE INFINIMENT MINCE

RELATION ENTRE :

D'UNE PART, LA FORME D'UNE VOÛTE INFINIMENT MINCE, INCOMPRESSIBLE, DONT CHAQUE ÉLÉMENT S'ORIENTE SUIVANT LA RÉSULTANTE DES FORCES QUI LUI SONT APPLIQUÉES, C-A-D UNE COURBE FUNICULAIRE DES CHARGES ;

D'AUTRE PART, UNE LIGNE LIMITANT LES CHARGES VERTICALES COMPTÉES A PARTIR DE LA VOÛTE, DITE LIGNE DE CHARGE.

CHAPITRE III. — VOÛTE D'ÉPAISSEUR FINIE SOUMISE A DES CHARGES OU SURCHARGES CONTINUES.

RECHERCHE PAR LE CALCUL DE LA FORME A LUI DONNER POUR QUE LE TRAVAIL MAXIMUM Y DÉPASSE PEU LE TRAVAIL MOYEN, C-A-D POUR QUE LES COURBES DE PRESSION S'ÉCARTENT PEU DE LA FIBRE MOYENNE.

RELATION ENTRE LES CHARGES ET LA FORME DE LA VOÛTE *(Suite)*

CHAPITRE IV. — UN ARC EST DIT ÉLASTIQUE QUAND LES DÉFORMATIONS Y SONT PROPORTIONNELLES AUX EFFORTS (Hypothèse de Hooke), ET QU'UNE SECTION PLANE RESTE PLANE APRÈS FLEXION (Hypothèse de Navier).

DANS QUELLES LIMITES EST-CE VRAI POUR LES VOÛTES, ET A-T-ON LE DROIT DE LES CALCULER COMME ÉLASTIQUES ?

ANNEXE

ÉPAISSEUR A LA CLEF DES VOÛTES INARTICULÉES

ERRATA

DU TOME III

Page 124, 1re ligne :

au lieu de : **Tlinthe**, lire **Plinthe.**

Voir aussi l'**Errata général,** à la fin du Tome V.

GRANDES VOÛTES

GRANDES VOÛTES

PAR

Paul SÉJOURNÉ

INGÉNIEUR EN CHEF DES PONTS ET CHAUSSÉES
INGÉNIEUR EN CHEF DU SERVICE DE LA CONSTRUCTION
DE LA COMPAGNIE PARIS-LYON-MÉDITERRANÉE
PROFESSEUR A L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES

TOME IV

2ME PARTIE — VOÛTES ARTICULÉES

BOURGES

IMPRIMERIE Vve TARDY-PIGELET ET FILS
15, RUE JOYEUSE, 15

—

1913

Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés pour tous pays.

Copyright by Paul Séjourné — 1913.

AVERTISSEMENT[1]

DIVISIONS DE L'OUVRAGE

CLASSEMENT DES PONTS EN SÉRIES ET DANS CHAQUE SÉRIE PAR DATE

TABLEAUX SYNOPTIQUES — MONOGRAPHIES

SUITE, DANS CHAQUE MONOGRAPHIE,

DE FIGURES, PLANCHES. PHOTOGRAPHIES, RENVOIS, SOURCES.

DÉSIGNATION ABRÉGÉE DES MATÉRIAUX

UNITÉS AUXQUELLES ON RAPPORTE LES QUANTITÉS ET DÉPENSES

1. Divisions de l'ouvrage. — Cet ouvrage est ainsi divisé :

1re Partie : Voûtes inarticulées[2]. — Ce sont les voûtes ordinaires, ainsi qualifiées par opposition aux voûtes articulées.

2e Partie : Voûtes articulées.

3e Partie : Ce que l'expérience enseigne de commun à toutes les voûtes.

Appendice : Pratique des voûtes. — Instructions pour projeter et construire. — Ouvrages courants, Viaducs..... — Répertoires. — Tables numériques.....

Dans les 1re et 2e Parties, sont décrits les ponts qui ont — ou qui avaient — des voûtes de 40m et plus de portée.

2. Classement des Ponts en séries. — J'ai classé par intrados les voûtes inarticulées, par type d'articulation les voûtes articulées.

Ce classement sera détaillé et justifié plus loin.

3. Classement dans chaque série par date d'exécution. — Dans chaque série, les ouvrages sont classés par date. On voit ainsi ce qui, dans un pont, est emprunté à un plus ancien.

4. Tableaux synoptiques. — Monographies. — Les dispositions comparables des ouvrages d'une série sont rapprochées dans des tableaux synoptiques : ainsi groupées elles instruisent.

1. — donné en tête des Tomes I, II, III.

2. — On les a quelquefois dites « encastrées » : à proprement parler, elles ne le sont pas.
En histoire naturelle, ce qui n'a pas d'articulation est justement qualifié « inarticulé ».

Viennent ensuite les monographies de chaque ouvrage : on y trouvera ce qui lui est spécial, description, histoire, dessins, photographies.

Pour tous les ponts, on a donné une élévation à la même échelle, 2^{mm}, de l'arche ou des arches de 40^{m} et plus.

Autant qu'on l'a pu, en restant clair, on n'a donné qu'une seule fois chaque indication, soit dans les tableaux synoptiques, soit dans la monographie, soit dans les dessins.

5. Suite, dans chaque monographie, de figures, planches, photographies, renvois, sources. — Chaque ouvrage a sa suite :

de figures : f_1 f_2..... ;

de planches : Pl_1 Pl_2..... ;

de photographies : φ_1 φ_2..... ;

de renvois au bas des pages : [1], [2]..... ;

de sources : S_1, S_2.... indiquées à la fin de chaque monographie, quelquefois subdivisées : S'_1, S''_1.....[3].

6. Désignation abrégée des matériaux aux tableaux synoptiques et aux dessins.

<table>
<tr><td colspan="4">Béton</td><td>B</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Moellons ordinaires</td><td colspan="3">employés en blocage sans préparation spéciale</td><td>MO</td></tr>
<tr><td rowspan="3">choisis (c'est-à-dire avec sujétion)</td><td rowspan="2">employés en parement</td><td>à joints incertains</td><td>MOI</td></tr>
<tr><td>grossièrement disposés par assises horizontales.</td><td>MOH</td></tr>
<tr><td>employés en voûte</td><td>méplats, lités, prolongeant, soit chaque lit de douelle, soit un lit sur 2, sur 3.</td><td>MOV</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Moellons à face rectangulaire, les 4 arêtes dans un même plan</td><td rowspan="2">Moellons équarris[4]</td><td colspan="2">»</td><td>ME</td></tr>
<tr><td colspan="2">taillés en voussoirs, lits pleins prolongeant exactement ceux de douelle. Joints et face de queue en partie pleins.</td><td>MEV</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Moellons d'appareil[5]</td><td rowspan="2">Dimensions imposées</td><td>»</td><td>MA</td></tr>
<tr><td>taillés en voussoirs, lits et joints pleins.</td><td>MAV</td></tr>
<tr><td>Libages</td><td colspan="3">Pierre de taille de grand appareil grossièrement équarrie.</td><td>L</td></tr>
<tr><td>Pierre de taille</td><td colspan="3">Blocs appareillés sur les 6 faces. Toutes les dimensions imposées.</td><td>PT</td></tr>
<tr><td colspan="4">Briques</td><td>Br</td></tr>
</table>

3. — On peut ainsi contrôler et apprécier les renseignements donnés.

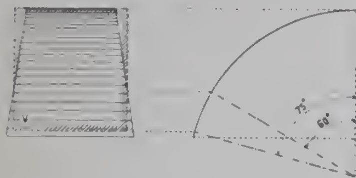
4. — Synonyme : Moellons têtués.

5. — Synonyme : Moellons smillés.

7. Unités adoptées pour comparer les quantités et dépenses.

A. — *Cintres.* — Dans la colonne 14 des Tableaux synoptiques, on a rapporté le cube de bois, le poids de fer et la dépense, au mètre carré de douelle d'une voûte V' à tympans verticaux, exigeant le même cintre.

La largeur uniforme de V' est celle de la voûte considérée :



au joint à 60° de la verticale pour les pleins cintres, les ellipses et les arcs de plus de 120° ;

aux naissances, pour les arcs de moins de 120° ;

c'est-à-dire, pour toutes les voûtes, au joint à partir duquel les voussoirs cessent de pouvoir être soutenus en faisant simplement déborder les couchis.

Comme il convient que les vaux se prolongent jusqu'à l'angle de 75°, on a pris pour surface de douelle celle de la voûte théorique V' :

à partir des angles de 75° pour les ellipses, pleins cintres, arcs de cercle de plus de 150° ;
à partir des naissances pour les arcs de cercle surbaissés de moins de 150°.

B. — *Ouvrage.* — La surface offerte à la circulation, S_p est le produit :

$$S_p = \begin{pmatrix}\text{Longueur totale entre les abouts} \\ \text{des parapets donnée colonne 2}\end{pmatrix} \times \begin{pmatrix}\text{Largeur disponible entre parapets} \\ \text{donnée colonne 3}\end{pmatrix}$$

S_p mesure l'utilité de l'ouvrage.

Soit S_e la surface vue d'élévation entre la voie portée, les murs en aile ou quarts de cône et le terrain naturel :

Je considère le volume $W = S_e \times$ (Largeur disponible entre parapets).

C'est le volume d'un mur plein ayant même surface d'élévation vue et même largeur utile que l'ouvrage. — Convenons de l'appeler le volume « utile ».

Soient Q et D le cube de maçonnerie de l'ouvrage et sa dépense.

$Q : S_p$ est le cube de maçonnerie à mortier par m. q. de surface horizontale utile. C'est l'épaisseur d'une dalle en maçonnerie de même cube que l'ouvrage et qui aurait même longueur et même largeur utile.

$Q : W$ est le cube de maçonnerie à mortier, par m. c. de volume « utile ».

$D : S_p$ est le prix du m. q. de surface offerte à la circulation.

$D : W$ est le prix du m. c. de volume « utile ».

Toutes ces quantités sont données à la colonne 18 des Tableaux synoptiques.

Quand les fondations sont très au-dessus de la vallée, on a donné de plus les rapports $Q : W'$, $D : W'$.

$W' = (S'_e$, Surface d'élévation au-dessus des fondations) $\times$ (Largeur disponible entre parapets).

W' est le volume « utile » au-dessus des fondations.

2e PARTIE

VOÛTES ARTICULÉES

LIVRE I

POURQUOI ET COMMENT
ON A ARTICULÉ DES VOÛTES

LIVRE II

DESCRIPTION DES PONTS
QUI ONT OU AVAIENT DES VOÛTES ARTICULÉES
DE 40^{m} ET PLUS DE PORTÉE

LIVRE III

CE QUE L'EXPÉRIENCE ENSEIGNE
DE SPÉCIAL AUX VOÛTES ARTICULÉES

INTRODUCTION

A L'ÉTUDE DES VOÛTES ARTICULÉES

En 1870, Dupuit proposa, le premier, d'articuler les voûtes.

De cette idée française, on a en France peu ou mal parlé : on ne l'y applique point. Mais, en Allemagne, on l'a fort bien accueillie : depuis quelque 30 ans, on y articule des voûtes.

Dans les voûtes articulées, on est sûr des efforts : on y peut faire plus et mieux travailler les matériaux.

Plus souples, elles se prêtent, sans fissures, à des mouvements qui troublent les autres. Il convient vraiment d'articuler les voûtes dont les appuis peuvent reculer, s'enfoncer inégalement.

On construit de plus en plus en béton : à peine de fissures graves, il est prudent d'articuler aussi les grandes voûtes plates en béton.

Il faut donc étudier les voûtes articulées : elles le méritent.

Au livre I, on indique pourquoi et comment on a articulé des voûtes ; au livre II, on décrit les grandes voûtes articulées ; au livre III, on conclut.

LIVRE I

POURQUOI ET COMMENT ON A ARTICULÉ DES VOÛTES

TYPES D'ARTICULATIONS

PRINCIPES. — FORMULES. — EXPÉRIENCES

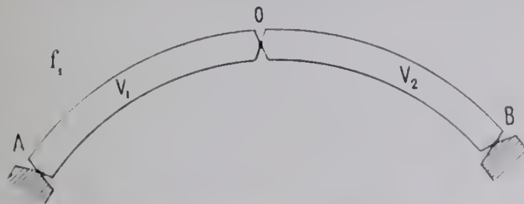
HISTORIQUE

CLASSEMENT DES VOÛTES ARTICULÉES

TITRE I

POURQUOI ON A ARTICULÉ DES VOÛTES

Dans une voûte articulée aux trois [1] points A, O, B (f_1), toute courbe de pression passe par A, O, B : avec la simple Statique, on a les efforts.



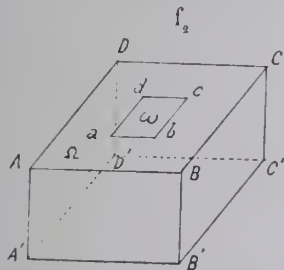
Si la voûte tasse, si les appuis reculent ou s'enfoncent, les deux demi-voûtes V_1, V_2 tournent, sans se fendre, autour de leurs articulations.

La voûte se calcule mieux et plus vite qu'inarticulée ; elle est plus souple.

TITRE II

PROPRIÉTÉ DE LA MATIÈRE QUI PERMET LES ARTICULATIONS

Considérons un prisme A B C D, A' B' C' D' (f_2).



Soient :

Ω la surface A B C D,

ξ_Ω l'effort par $\overline{0^m01}^2$ qui, uniformément distribué sur Ω, écrase le solide,

β_Ω la limite de travail permis sur Ω.

Découpons sur Ω un petit rectangle *abcd* de surface ω.

L'expérience montre que, pour écraser le solide, il faut appliquer sur ω un effort par $\overline{0^m01}^2$ ξ_ω supérieur à ξ_Ω. On y pourra donc accepter un travail β_ω supérieur à β_Ω.

1. — Les voûtes en maçonnerie, articulées, ont toujours trois articulations.

Quelques voûtes, mais en béton armé, en ont :
deux (Ludwigsbrücke sur la Schwabach, à Erlangen, portée entre rotules, 23m30, surbaissement 1/11) ;
une (Pont de Payerbach sur le Schwarzafluss, portée 26m, flèche 1m80).

C. Kersten. — « *Brucken in Eisenbeton* » Teil II : « *Bogenbrücken* ». — Berlin 1910, pages 153, 159

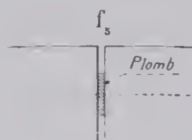
L'expérience [2,3] n'a pas dégagé de relation nette entre $\frac{\xi_\omega}{\xi_\Omega}$ et $\frac{\omega}{\Omega}$.

TITRE III

COMMENT ON A ARTICULÉ LES VOÛTES : QUATRE TYPES D'ARTICULATIONS

CHAPITRE I

ARTICULATIONS SUR PLOMB



§ 1. — *PRINCIPE*

Des bandes de plomb occupent la partie centrale des joints de clef et de retombées (f_5).

§ 2. — *PROPRIÉTÉS DU PLOMB*

Sous une charge croissante, le plomb, à partir d'une certaine limite, coule, s'étale, mais sans perdre sa cohésion. Son épaisseur diminue, sa section aug-

2. — Expériences de M. Durand-Claye sur des cubes de 10^{cm} pressés par une plaque carrée, en pierres s'écrasant : les unes à 84^k, les autres à 576^k.
Annales des Ponts et Chaussées, 1887, - août - p. 230, M. Flamant.

Expériences de M. Bauschinger sur des cubes d'un grès s'écrasant à 685^k $\overline{0^m01}^2$, pressés par une plaque carrée d'acier de côté z variable (f_3).

Dimensions des blocs *(en 0m01)* a	b	h	Côté de la plaque d'acier *(en 0m01)* z	Effort en kg/$\overline{0^m01}^2$ sous la plaque d'acier au moment de la rupture $\xi_\omega = \frac{P}{z^2}$	*Rapports* $\frac{\omega}{\Omega} = \frac{z^2}{ab}$	$\frac{\xi_\omega}{\xi_\Omega = 685^k}$
10	9·9	9·65	3·9	1052^k	*0,151*	*1,536*
9.85	9.9	9.70	5.7	923	*0,333*	*1,347*
10	9.85	9.70	7.8	772	*0,618*	*1,127*

« *Mitteilung des mech. tech. Laboratoriums der Technischen Hochschule in Munchen* », 1876, 6e Heft, p. 13.

Les pierres tendres et les pierres dures se comportent de façon très differente.
M. Mesnager : *Cours* (autographié) *de Matériaux de Construction*, professé à l'Ecole des Ponts et Chaussées, - 4e Partie, p. 69.

3. — Expériences de M. Bach à Stuttgart, en 1888, sur des cubes d'un grès s'écrasant à 653^k, pressés par une bande d'acier p de largeur z variable (f_4).

Dimensions des blocs *(en 0m01)* a	b	h	Largeur de la bande d'acier *(en 0m01)* z	Effort en kg/$\overline{0^m01}^2$ sous la bande d'acier au moment de la rupture $\xi_\omega = \frac{P}{bz}$	Rapports $\frac{\omega}{\Omega} = \frac{z}{a}$	$\frac{\xi_\omega}{\xi_\Omega = 653^k}$
6·46	6·03	6·00	6·03	653^k	0,933	1
10.04	9.99	9.89	2.50	926	0.249	1,418
10.01	10.01	9.85	2.00	943	0,200	1,453
10.02	10.03	9.82	1.50	1044	0.150	1,599
9.99	9.95	9.84	1.00	1193	0,100	1,827
9.96	10.02	9.84	0.50	2050	0,050	3,139

Bach. « *Elastizität und Festigkeit* ». Berlin chez Springer, 1889-1890, p. 49.

mente, de sorte que l'effort par $\overline{0^m01}^2$ sur la section ainsi augmentée croît peu[4, 5].

La résistance par $\overline{0^m01}^2$ augmente quand l'épaisseur diminue[6, 7, 8, 9].

On l'accroît en trempant le plomb, en lui alliant de l'antimoine[8].

4. — Voici ce qu'a produit une charge croissant jusqu'à 930k sur un cube de 8cm.

La hauteur a diminué de 5cm7 ; la base s'est étalée de 64cm² à 196cm² ; la pression sur la base primitive s'élevant de 310k à 930k, la pression sur la base élargie n'a augmenté que de 239k à 304k.

Zeitschrift für Bauwesen, 1888, p. 235 à 260, Pl. 38, 39, 40 : « *Steinbrucken mit gelenkartigen Einlagen* », Stuttgart novembre 1887, Leibbrand, Kgl. Ober-Baurat.

5. — Sous une trop forte pression, le plomb coule continuement.

Au Viaduc du Viaur, on a soumis pendant 859 jours à une pression de 120k deux plaques de plomb de 9mm68 d'épaisseur initiale : elles ont cédé assez régulièrement par jour de 2μ32, soit $\frac{2,4}{10^4}$ de leur épaisseur.

Expériences de M. Lannusse, Ingénieur des Ponts et Chaussées, 1901-1903.

6. — En plaques carrées de 10cm, le plomb mou a coulé :

avec 8mm d'épaisseur, sous 425k par $\overline{0^m01}^2$;

avec 4mm d'épaisseur, sous 575k.

Expériences faites à Munich. — Deutsche Bauzeitung, 1906, 21 avril, p. 219 à 222 ; 28 avril, p. 232 à 236 ; 12 mai, p. 261 à 264 : « *Die Illerbrücken bei Kempten in Allgäu* », von Regierungs Baumeister a. D. Colberg, Direktor der Firma Dyckerhoff und Widmann, p. 263.

De même, le mortier résiste en briquettes « normales » de 22mm d'épaisseur, 1 fois 1/2 à 2 fois comme en cubes ; — en joints minces, 2 à 4 fois comme en cubes.

Communication faite par M. H. Tavernier, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, au Congrès des Méthodes d'essais, Paris, 9-16 juillet 1900.

7. — Aux essais faits à Munich par M. le Professeur Föppl, une bande de plomb de 10cm × 30cm × 5mm.

chargée, par $\overline{0^m01}^2$, de :	s'est comprimée, sous la charge, de :	après enlèvement de la charge, est restée comprimée de :	
280k	1mm2	1mm09	sans couler
840k	1mm24	1mm10	sans couler
1030k	»	»	en commençant à couler
1200k	»	1mm5 au max.	en s'élargissant par places de 1cm

Beton und Eisen, 1904, p. 9 à 17, Pl. II. « *Munchner Bruckenbauten* » *II.* « *Die Reichenbachbrücke in München* ». E. Burk.

8. — Essais faits en 1885 à Stuttgart au « Material-Prüfungs-Anstalt ».

	Charge en kg $\overline{0^m01}^2$, supportée		Sources
	sans déformation	en s'affaissant lentement	
Cubes de 8cm — Plomb fondu	52k pendant 26h sans gonflement latéral	74k - Gonflement latéral	Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1885, p. 629.
Cubes de 8cm — Plomb trempé	258k	310k	
Disques de plomb fondu ou laminé, de 16cm de diamètre, 15mm d'épaisseur	103k	155k	
Plaques carrées de 7cm de côté, 25mm d'épaisseur, à 5 0/0 d'antimoine	413k	517k	Fortschritte der Ingenieurwissenschaften. « *Gewölbte Brucken* », K. von Leibbrand. Leipzig, 1897, p. 45.

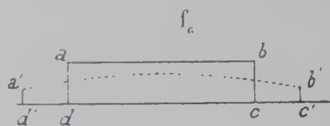
9. — Aux essais faits par M. Beutel, Ingénieur en chef de la Construction des Chemins de fer bavarois, à Munich, des plaques de plomb de 5cm1 × 5cm1 × 8mm :

chargées par $\overline{0^m01}^2$ de :	39k	77k *	115k	154k	192k	400k
se sont comprimées de :	0mm08	0mm16	0mm20	0mm53	0mm39	2mm44

* plus grande pression réalisée dans les ponts pour lesquels on a fait les essais.

Renseignements gracieusement adressés par M. Beutel, — juillet 1911.

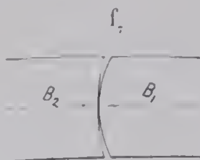
§ 3. — *COMMENT UNE BANDE DE PLOMB RÉALISE UNE ARTICULATION* [10]



Le dessus plan, *ab*, des bandes de plomb, coule sous la compression[11] qui s'exerce, tantôt sur *a*, tantôt sur *b*, et prend la forme *a'b'* (f_6).

CHAPITRE II

ARTICULATIONS ROULANTES [12]



§ 1. — *PRINCIPE*

Un bloc convexe B_1 roule sur un bloc concave ou plan B_2 (f_7). Ils sont, ou en acier, ou en pierre dure, ou en béton, armé ou non.

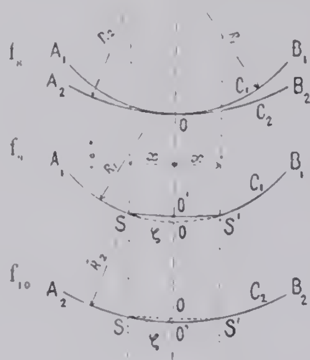
§ 2. — *FORMULES THÉORIQUES DONNANT :*

1° - LA LARGEUR EN 0m01 DE LA BANDE DE CONTACT ;

2° - LE TRAVAIL MAXIMUM PAR $\overline{0^m01}^2$ AU CONTACT.

Art. 1. — Notations et unités, employées dans les formules.

Plaçons le cylindre convexe de rayon R_1 sur le cylindre concave de rayon R_2 (f_8).



S'il y a pression, le contact, d'abord réduit à l'arête O, s'élargit à $2x$ (f_9, f_{10}).

A_1OB_1 s'aplatit (f_9) et A_2OB_2 se creuse (f_{10}) suivant la courbe SO'S' de flèche OO' = ζ.

La compression β (kg $\overline{0^m01}^2$) est maxima en O, nulle en S et S'.

Moins les rayons diffèrent, plus est large la bande de contact, plus y est réduit le travail par $\overline{0^m01}^2$, mais moins est fixé le centre de pression.

10. -- On a très exceptionnellement employé, au lieu de plomb, des plaques d'asphalte :
en 1886, à un pont en béton de 29m à Erlach, (Deutsche Bauzeitung, 1906, p. 595 : *Fortschritte im Bau weitgespannter massiver Brucken*, Landesbaurat Leibbrand),
en 1890, aux naissances des 2 voûtes en béton de 23m au 1 5, expérimentées par la Commission des Ingénieurs et Architectes autrichiens, (Tome III - Liv. II).

11. — Les feuilles de plomb sous les appuis des tabliers métalliques se maintiennent si elles sont emprisonnées dans des feuillures. Sinon, elles s'allongent en long et en travers : on a constaté des allongements atteignant 15cm.

A l'entrée d'un train, le bord extrême rencontré le premier cède ; puis, la travée chargée prend une flèche qui comprime l'autre bord.

12. — « *Walzgelenke* » des Ingénieurs allemands.

Soient :

R_1, R_2, les deux rayons en 0m01 ;

N la pression normale en kg. par 0m01 de longueur d'arête (pression totale en kg. divisée par la longueur en 0m01 de l'arête) ;

$\varepsilon_1 \times \overline{10}^5$, $\varepsilon_2 \times \overline{10}^5$, les coefficients d'élasticité des deux solides B_1, B_2 (kg $\overline{0^m01}^2$)

ν_1, ν_2, les coefficients de Poisson, c'est-à-dire les rapports :

$$\frac{\text{dilatation transversale relative}}{\text{raccourcissement longitudinal relatif}}$$ [13, 14]

Les formules théoriques indiquées plus loin supposent la matière homogène et isotrope : elles donnent, en fonction de R_1, R_2, N, ε, ν, la largeur $2x$ (en 0m01) de la bande de contact, et le travail maximum qui s'y produit, MAX β (en kg $\overline{0^m01}^2$).

Art. 2. — Formules de Hertz. — Hertz[15] a, par la théorie de l'Elasticité, établi des formules qui, avec mes notations et unités, sont les suivantes :

$$2x = \frac{4}{100\sqrt{10\pi}} \sqrt{\left(\frac{1-\nu_1^2}{\varepsilon_1} + \frac{1-\nu_2^2}{\varepsilon_2}\right) \frac{N}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}}} \qquad (1)$$

$$\text{MAX } \beta = \frac{4}{\pi}\left(\frac{N}{2x} \text{ pression moyenne}\right) = \frac{100\sqrt{10}}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{N}{\frac{1-\nu_1^2}{\varepsilon_1} + \frac{1-\nu_2^2}{\varepsilon_2}} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)} \qquad (2)$$

Si, (et c'est le cas général), les deux cylindres sont de même matière, $\nu_1 = \nu_2$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$; les formules deviennent :

$$2x = \frac{4\sqrt{2}}{100\sqrt{10\pi}} \sqrt{\left(\frac{1-\nu^2}{\varepsilon}\right) \frac{N}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}}} = \frac{\eta}{\sqrt{\varepsilon}} \sqrt{\frac{N}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}}} \qquad (1')$$

$$\text{MAX } \beta = \frac{4}{\pi}\left(\frac{N}{2x}\right) = \frac{100\sqrt{10}}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{N\varepsilon}{1-\nu^2}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)} = \chi\sqrt{\varepsilon}\sqrt{N\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)} \qquad (2')$$

Pour $\nu =$	0,25	0,30	1/3
on a : $\eta =$	0,009772	0,009628	0,009515 [17]
$\chi =$	130,294	132,248	133,809

13. — Soient : b une dimension transversale, l une dimension longitudinale : on a $\nu = \dfrac{\frac{\Delta b}{b}}{\frac{\Delta l}{l}}$.

14. — Pour les corps homogènes isotropes, Poisson avait indiqué la valeur théorique $\nu = \frac{1}{4}$.

L'expérience donne : entre 0 et 1/2 pour tous les corps solides ; - entre 0,26 et 0,36 pour l'acier ; - des valeurs très diverses pour la pierre.

M. Mesnager : *Cours* (autographié) *de Matériaux* professé à l'Ecole des Ponts et Chaussées, 5e Partie : Métaux, - 1909, p. 26, 27.

15. — Journal für die reine und angewandte Mathematik, 1882, p. 156 à 171 « *Über die Berührung « fester elastischer Körper* ». Heinrich Hertz - Janvier 1881.

16. — Soient 2 rotules de mêmes rayons R_1, R_2, soumises au même effort N par 0m01 de contact, ayant même μ ; le rapport des largeurs de contact sera : $\frac{2x}{2x'} = \sqrt{\frac{\varepsilon'}{\varepsilon}}$.

17. — En interprétant les formules de M. Boussinesq « *Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques* » (1885), M. l'Ingénieur en chef Galliot et M. Rousseau ont retrouvé les formules de Hertz, mais avec :

$\eta = 0{,}00691$ et $\chi = 184$ (M. Galliot).

$\eta = 0{,}00957$ et $\chi = 132{,}98$ (M. Rousseau).

Annales des Ponts et Chaussées, septembre 1892, p. 391 et suivantes. « *Note sur le calcul des efforts dans les corps cylindriques en contact* ». M. Galliot, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

Annales des Travaux publics de Belgique, avril 1910, n° 2, p. 181. « *Note relative au Calcul des rotules et des rouleaux de « dilatation* », par E. Rousseau, Capitaine du Génie de réserve, Ingénieur aux Ateliers de construction électrique de Charleroi.

Si on accepte :

$$\eta = 0{,}0096 \qquad \chi = 132$$

les 2 formules pratiques à appliquer sont :

$$2x \left(\begin{smallmatrix}\text{largeur en } 0^{m}01 \\ \text{de la bande de contact}\end{smallmatrix}\right) = \frac{0{,}0096}{\sqrt{\varepsilon}} \sqrt{\frac{N}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}}} \qquad (1'')$$

$$\text{MAX } \beta \left(\begin{smallmatrix}\text{effort maximum en Kg}/\overline{0^{m}01}^2 \\ \text{dans la bande de contact}\end{smallmatrix}\right) = 1{,}273 \left(\frac{N}{2x}\right) = 132\sqrt{\varepsilon} \sqrt{N\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)} \qquad (2'')$$

	Pierres							Acier		
		Béton de ciment								
Pour ε =	1	1 1/2	2	3	4	5	6	18	20	22
$\frac{0{,}0096}{\sqrt{\varepsilon}}$ =	0,0096	0,0078	0,0068	0,0055	0,0048	0,0043	0,0039	0,00226	0,00215	0,00205
$132\sqrt{\varepsilon}$ =	132	162	187	229	264	295	323	560	590	619

Pour $R_1 = R_2$, on aurait $2x = \infty$ et MAX $\beta = 0$. Les formules ne s'appliquent pas pour R_1, R_2 peu différents.

Pour un cylindre convexe roulant sur un plan ($R_2 = \infty$), les équations 1", 2" deviennent :

$$2x = \frac{0{,}0096}{\sqrt{\varepsilon}} \sqrt{NR} \qquad (1''')$$

$$\text{MAX } \beta = \frac{4}{\pi}\left(\frac{N}{2x}\right) = 1{,}273\left(\frac{N}{2x}\right) = 132\sqrt{\varepsilon}\sqrt{\frac{N}{R}} \qquad (2''')$$

Art. 3. — Formules de Köpcke (f_{11}).

f_{11}

$$\text{MAX } \beta = 25 \sqrt[3]{\frac{9}{10} \frac{N^2 \varepsilon}{h} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)}$$

$$2x = \frac{3\,N}{2 \text{ MAX } \beta} = 0{,}02 \sqrt[3]{\frac{30\,Nh}{\varepsilon\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)}}$$

Si une des 2 surfaces est plane, $R_2 = \infty$.

$$\text{MAX } \beta = 25 \sqrt[3]{\frac{9\,N^2 \varepsilon}{10\,Rh}} \quad {}^{20} \qquad\qquad 2x = 0{,}02 \sqrt[3]{\frac{30\,N\,Rh}{\varepsilon}}$$

18. — Zeitschrift des Architekten und Ingenienr Vereins zu Hannover, 1888, p. 373 à 380. « *Uber die Verwendung von drei Gelenken in Steingewolben* », von Geh. Finanzrath C. Köpcke zu Dresden.

19. — Elles résultent d'une série d'hypothèses, dont quelques-unes un peu osées.

f_{12}

20. — Si au lieu d'un bloc d'articulation on avait un rouleau de longueur l entre 2 plaques (f_{12}), $h = R$,

$$\text{MAX } \beta = 25\sqrt[3]{\frac{9\,N^2\,\varepsilon}{10\,R^2}}$$

D'où :

$$Nl = P = \frac{8}{3}\,lR \text{ MAX } \beta \sqrt{\frac{\text{MAX } \beta}{\varepsilon \times 10^5}}$$

C'est la formule en usage pour calculer les rouleaux de dilatation des ponts métalliques. (M. Résal. *Ponts métalliques*, chez Baudry, 1885, Tome I, p. 91).

Art. 4. — Formules de Barkhausen [21] (f_{11}).

Soit :

$$c = \frac{R_1 \varepsilon \times \overline{10}^5 \times e\left(1 - \frac{R_1}{R_2}\right)}{4\,N h}$$

M. Barkhausen propose :

$$\frac{x}{R_1}\left[\frac{\text{MAX. }\beta}{\frac{N}{e}} - \frac{c}{3}\,\frac{x^2}{R^2_1}\right] = \frac{e}{2\,R_1} \qquad (1)$$

$$R_1 = \frac{R_2}{2} + \sqrt{\frac{R^2_2}{4} - \frac{4\,N R_2 h \log.\text{ nat.}\left(1 + \frac{\text{MAX. }\beta}{\frac{N}{e}}\right)}{\varepsilon \times \overline{10}^5 \times e \times \left(\frac{x}{R_1}\right)^2}} \qquad (2)$$

Ces formules supposent R_1 compris entre $\frac{R_2}{2}$ et R_2 : elles ne s'appliquent, ni pour R_1 très voisin de R_2, ni pour $R_2 = \infty$ (surface convexe roulant sur un plan).

On les résout par essais [22], [23] ; ils ne laissent pas d'être assez longs.

21. — Centralblatt der Bauverwaltung, 16 mai 1900, p. 232 : « *Berechnung der in den Gelenken stei-* « *nerner Brücken auftretenden grössten Pressungen* », M. Schuster.

22. — Voici le calcul de x et de MAX. β fait par M. Barkhausen [×] pour l'articulation de clef du Pont de Hauconcourt sur la Moselle : (Portée, 33^m ; montée, 4^m30).

$R_1 = 235^{cm}$, $R_2 = 300^{cm}$, $h = 61^{cm}$, $e = 70^{cm}$, $N = 1590^k$, $\varepsilon = 2$, d'où $c = 1837$.

L'équation (1) est :

$$\frac{x}{R_1}\left[\frac{\text{MAX. }\beta}{\frac{1590}{70}} - \frac{1837}{3}\,\frac{x^2}{R^2_1}\right] = \frac{70}{2 \times 235}, \text{ d'où MAX. }\beta = \frac{1590}{70}\left[\frac{70}{2 \times 235}\,\frac{1}{\frac{x}{R_1}} + \frac{1837}{3}\,\frac{x^2}{R^2_1}\right]$$

L'équation (2) est : $235 = \frac{300}{2} + \sqrt{\frac{\overline{300}^2}{4} - \frac{4 \times 1590 \times 300 \times 61}{2 \times \overline{10}^5 \times 70 \times \frac{x^2}{R^2_1}} \log.\text{ nat.}\left(1 + \frac{\text{MAX }\beta}{\frac{1590}{70}}\right)}$

Essayons $\frac{x}{R_1} = 0{,}0316$

$$\text{MAX. }\beta = \frac{1590}{70}\left[\frac{70}{2 \times 235} \times \frac{1}{0{,}0316} + \frac{1837}{3}\;\overline{\times\; 0{,}0316^2}\right] = 121^k$$

$$235 = 150 + \sqrt{22500 - \frac{116{,}388}{14} \times \frac{1{,}84371}{\overline{0{,}0316}^2}} = 234{,}6$$

Approximation suffisante.

Avec cette valeur de $\frac{x}{R_1}$ les formules donnent : MAX. $\beta = 121^k$ $2x = 14^{cm}8$.

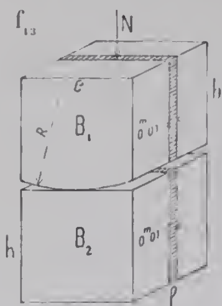
[×] A. Teichmann : « *Zahlenbeispiel zur statischen Berechnung von massiven Dreigelenkbrücken vermittelst Einflusslinien* », p. 3, C. W. Kreidel's Verlag, Wiesbaden 1904.

23. — Les formules de Hertz, Barkhausen, Köpcke, donnent des résultats fort différents. Les voici pour la clef du Pont de Hauconcourt (*Art. 1, renr. 22*) :

Formules de	Hertz	Köpcke	Barkhausen
$2x$	8^c8	23^c	14^c8
MAX. β	229^k	103^k	121^k

§ 3. — *EXPÉRIENCES SUR DES ARTICULATIONS EN PIERRE, EN BÉTON*

Art. I. — Expériences de M. Bach sur des blocs de granit et de grès, l'un convexe, l'autre plan (f_{13}), pour vérifier les formules de Hertz (§ 2, art. 2) :



$$2x \left(\begin{matrix} \text{Largeur en } 0^{m}01 \\ \text{de la bande} \\ \text{de contact} \end{matrix} \right) = \frac{0{,}0096}{\sqrt{\varepsilon}} \sqrt{NR} \quad (1''')$$

[24]

$$\text{MAX } \beta \left(\begin{matrix} \text{effort maximum} \\ \text{en Kg } 0^{m}01^{2} \text{ sur} \\ \text{l'arête de contact} \end{matrix} \right) = 1{,}273 \left(\frac{N}{2x} \right) = 132 \sqrt{\varepsilon} \sqrt{\frac{N}{R}} \quad (2''')$$

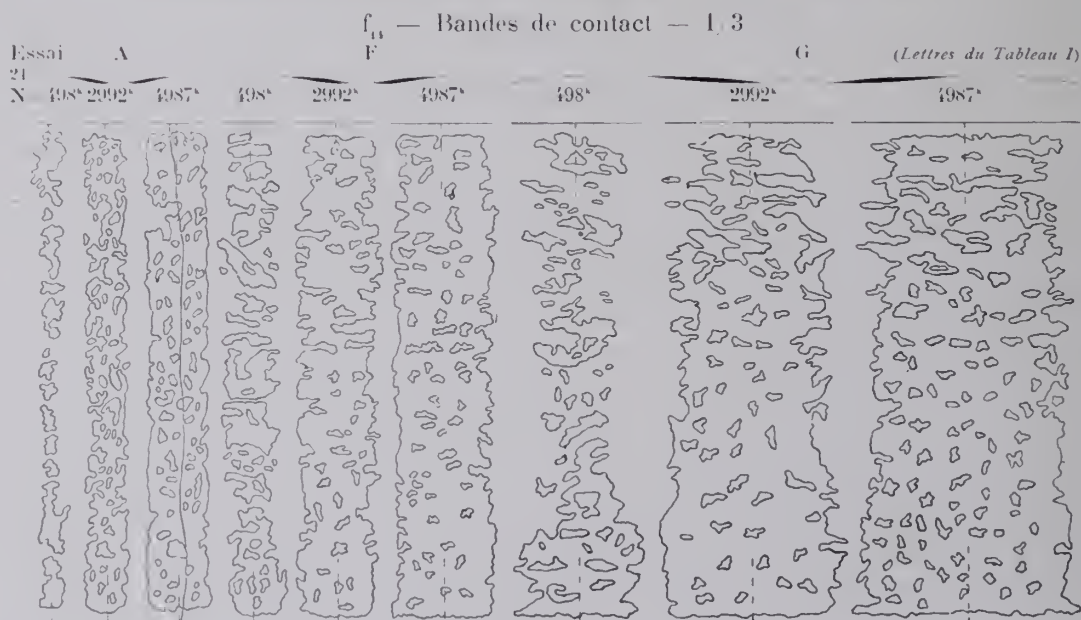
A. - Ce qui a été observé. — M. Bach a éprouvé : d'abord des blocs de granit à surfaces très exactement tournées et dressées [25] ; plus tard, du grès [26].

Il a relevé les empreintes du contact sous les charges N, les a planimétrées, puis, en divisant leur surface par la longueur l du contact, obtenu la largeur $2x$.

On n'a pas le moyen de mesurer MAX β : on a seulement $\frac{N}{2x}$.

Les deux surfaces, pressées l'une contre l'autre, se touchent, non suivant une bande pleine, mais d'abord par des îlots isolés, puis par des surfaces continues, mais avec des îlots non pressés (f_{14}).

Expériences sur des blocs de granit ($e = 30^{cm}$, $h = 50^{cm}$).



24. — Les notations et unités sont celles indiquées § 1, art. 1, - et répétées p. 15.

25. — Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1903, p. 1439 : « *Versuche mit Granitquadern zu Brückengelenken* », C. Bach.

26. — Id., 1904, p. 1915. « *Versuche mit Sandsteinquadern zu Brückengelenken* », C. Bach.

Tableau I. — Largeur $2x$. — Rapports $\frac{2x}{\sqrt{N}}$, $\frac{0,0096^2\,NR}{4x^2}$ [qui, d'après la formule (I''') de Hertz devrait être ε *]

ε * (pour le granit éprouvé) : 2,55 à 4,02 * ε × 10^5 = Coefficient d'élasticité en Kg $\overline{0^m01}^2$

R Rayon du bloc convexe													
25 cm	l..... (Longueur en 0^m01 de l'arête de contact)	20'05 (A)				20'15 (B)				20'05 (C)			
	N.... (en Kg par 0^m01 de l)	498k	2493k	4738k	4987k Rupture		2853k	4094k	4590k Rupture	498k	2493k	4488k	4728k Rupture
	$2x$.... (Largeur moyenne mesurée de la bande)	0'42	0'90	1'35	1'40		1'16	1'23	1'24	0'43	0'99	1'40	1'47
	$\frac{2x}{\sqrt{N}}$...	0.018	0,018	0,019	0,019		0.021	0,019	0.018	0,019	0.019	0,020	0.021
	$\frac{0,0096^2\,NR}{4x^2} = \varepsilon$	6,99	6,99	6,27	6.27		5.13	6,27	6,99	6.27	6,27	5.66	5.13
100 cm	l.....	20'10 (D)				20'10 (E)				20'05 (F)			
	N...	497k	2485k	3980k	4975k Rupture	497k	2985k	4975k	5970k Rupture	498k	2992k	5984k	6483k Rupture
	$2x$....	0'95	2'16	2'73	3'05	1'01	2'51	3'32	3'68	1'01	2'32	3'43	3'59
	$\frac{2x}{\sqrt{N}}$...	0,042	0,043	0,043	0,043	0,045	0,045	0,047	0.047	0,045	0.042	0,044	0.044
	$\frac{0,0096^2\,NR}{4x^2} = \varepsilon$	5,13	4.01	4,01	4,01	4.47	4,47	4,10	4,10	4,47	5.13	4,68	4,68
375 cm	l.....	20'05 (G)				20'00 (H)				20'10 (I)			
	N....	498k	3990k	7481k Rupture		500k	4000k	7640k Rupture		497k	3980k	7960k Rupture	
	$2x$....	1'47	5'44	7'85		2'02	5'54	8'66		2'24	6'74	9'11	
	$\frac{2x}{\sqrt{N}}$...	0,065	0.086	0,090		0,090	0,087	0.099		0,100	0,106	0.102	
	$\frac{0,0096^2\,NR}{4x^2} = \varepsilon$	8,04	4,68	4,18		4,29	4,68	3,52		3.48	3,10	3,35	

Tableau II. — Rupture des blocs.

$\mathfrak{N}$ Charge de rupture par 0m01 d'arête

Pression de rupture dans la bande de contact (en Kg $\overline{0^m01}^2$) { moyenne $\frac{\mathfrak{N}}{2x}$; MAX (sur l'axe de la bande) $= 1,273\,\frac{\mathfrak{N}}{2x} = \Xi$ }

II_A — Granit — ξ (résistance à l'écrasement en cubes) = 1200k à 1500k

R (en 0m01)	25cm (A)	25cm (B)	25cm (C)	100cm (D)	100cm (E)	100cm (F)	375cm (G)	375cm (H)	375cm (I)
$\frac{2x}{l}$	0,046	0,041	0,049	0,10	0.12	0,12	0,29	0.29	0.30
$\mathfrak{N}$	4987k	4590k	4728k	4975k	5970k	6483k	7481k	7640k	7960k
$\frac{\mathfrak{N}}{2x}$	3562k	3701k	3216k	1631k	1622k	1806k	953k	882k	873k
Ξ	4536k	4727k	4106k	2077k	2066k	2300k	1214k	1124k	1113k

II_B — Grès — ξ (résistance à l'écrasement en cubes) = 540k à 620k

R (en 0m01)	10cm	20cm	40cm	100cm	375cm
$\frac{2x}{l}$	0,088	0,119	0,20	0,37	0,91
$\mathfrak{N}$	1366k	1466k	1826k	2686k	6666k
$\frac{\mathfrak{N}}{2x}$	1030k	814k	606k	483k	486k
Ξ	1312k	1037k	772k	616k	619k

B. - Ce qui résulte des expériences.

I. Largeur 2 x de la bande de contact (Granit – Tableau I).

a. – Pour le rayon de 25cm et celui de 100cm, $\frac{2x}{\sqrt{N}}$ a été sensiblement constant, c'est-à-dire que, suivant la formule (1''') de Hertz, la largeur de la bande de contact a été, pour ces 2 rayons, proportionnelle à la racine carrée de la charge.

b. – Le rapport $\frac{\overline{0,0096}^2 NR}{4x^2}$ a varié de 3 à 8. Or, d'après la formule (1''') de Hertz, ce serait le coefficient ε, lequel, pour le granit éprouvé, ne variait que de 2,55 à 4,02.

II. Rupture. — Charge $\mathfrak{N}$ sur la bande de contact.

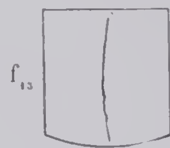
Pressions moyenne $\frac{\mathfrak{N}}{2x}$ *et maxima* $\Xi = 1,273 \frac{\mathfrak{N}}{2x}$ (Granit et grès – Tableaux II_A et II_B).

a. – R augmentant, $\mathfrak{N}$ augmente, Ξ diminue et paraît tendre vers la pression de rupture du matériau en cubes.

b. – Pour un même rayon, Ξ augmente avec l'épaisseur *e* [27].

c. – Sur 9 essais, le bloc convexe B_1 s'est rompu 2 fois le 1er.

d. – Les blocs se fendent, à partir du contact, près du plan diamétral passant par l'arête de contact : on voit, sur la photographie de blocs sous charge, la fissure plus ouverte au milieu ; elle se refermait quand on supprimait la pression.



f_{13}

C'est la tension qui rompt les blocs.

D'ailleurs, les pierres ne sont ni homogènes, ni isotropes ; elles n'ont pas, à vrai dire, de coefficient d'élasticité [28] ; les rotules de pierre s'appliquent mal l'une sur l'autre ; toutes conditions contraires à celles que supposent les formules de Hertz [29].

Il ne faut donc pas s'étonner si les essais ne les justifient guère.

27. — R = 20cm, h = 15cm

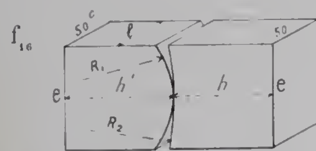
e =	10cm	15cm	20cm
Ξ =	925k	1037k	1150k

loc. cit., renvoi 26.

28. — Tome III, Livre II.

29. — Hertz a vérifié ses théories pour le verre : lentille de verre sur plaque de verre.

f_{16}



Art. 2. — Expériences faites à Berlin et à Dresde sur des rotules en béton [30] (f_{16}).

Expériences faites : au Laboratoire mécano-technique de	à l'occasion de la construction de 4 Ponts sur la Moselle Nom - (*Portée*) Max. ε (clef) kg $\overline{0^m01}^2$	Rotules éprouvées — Dimensions en 0m01 — R_1	R_2	e	h (h')	Composition du béton	Âge du béton en jours	Charge, en Tonnes, par 0m01 de l produisant : la première fissure dans le bloc — concave $\mathfrak{N}$	convexe $\mathfrak{N}$	la rupture $\mathfrak{N}$
Charlottenburg (Berlin)	[31] Hauconcourt (*33m*) 25k	235^c	300^c	70^c	61^c	$1^v, 2^v5, 2^v5$ — noyau : $1^v, 1^v5, 1^v5$	150 j	4^t7 [35] 4^t2 [35]	— —	— 10^t
	[32] Malling 1899-1901 (*40m*) 22k8	280^c	325^c	94^c5	91^c	[36, 38] $1^v, 2^v, 2^v$	400 j	8^t 7^t4 7^t5 7^t1	9^t1 5^t3 7^t4 7^t	— — — —
	[33] Moulins-lès-Metz 1904-1905 (*44m*) 23k34	280^c	325^c	95^c5	93^c5 (96^c) 94^c5 (96^c5)	[36, 38] $1^v, 2^v, 2^v$	115 j 116 j 126 j	8^t1 [35] 8^t4 [35] 7^t3 [35]	Pas de fissure sous : 11^t8 11^t7 [35] 9^t1 [35]	Pas de rupture sous : — 11^t8 [37] 12^t [37]
Dresde	[34] Sauvage 1906-1907 (*36m*) 23k	250^c	327^c	65^c	70^c	[36, 38] $1^v, 2^v, 2^v$	210 j	5^t5 7^t 6^t	Pas de fissure 7^t2 6^t7	10^t7 12^t7 12^t2

Voici des largeurs de bande de contact observées au laboratoire de Dresde sur des rotules de mêmes dimensions que celles du pont de Sauvage (béton à 170 jours) :

Charge en kg par 0m01 d'arête de contact N	Largeur de la bande de contact en 0m01 : $2x$ — mesurée	calculée par la formule de Hertz (§ 2, art. 2) $\frac{0{,}0096}{\sqrt{\varepsilon}}\sqrt{\frac{N}{\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}}}$ Avec $\varepsilon = 1.5$	Barkhausen (§ 2, art. 4)
2000^k	7^c5	11^c3	19^c5
4000^k	14^c3	16^c	23^c8
6000^k	18^c5	19^c6	30^c

30. — Centralblatt der Bauverwaltung, 22 juillet 1908, p. 395, 396. « *Über Gelenkquader aus Beton* » vom Regierungs und Geheimen Baurat Blumhardt in Strassburg, et : Deutsche Bauzeitung 1908, 23 mai p. 283 à 288, 3 juin p. 303 et 307. « *Die Anwendung von Gelenken bei Brückenbauten.* » M. A. Kohler, Ing. dipl. Dir. technique de la Maison Windschild et Langelott de Cossebaude, près Dresde.

31, 32, 33, 34. — Voir pour ces ponts Livre III

35. — Fissure dans le plan de symétrie passant par l'arête de contact.

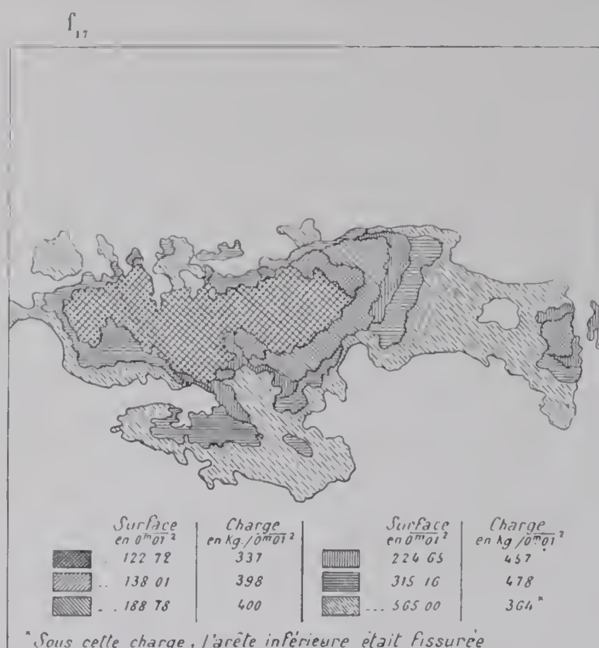
36. — Surfaces de contact au mortier à 1^v, 1^v.

37. — Puissance maxima de la presse.

38. — Voici la moyenne de 3 essais sur des cubes de 30^c :

Âge du béton en jours	Charge en kg $\overline{0^m01}^2$ produisant — les fissures	la rupture
59 j	341^k	359^k
87 j	445^k	466^k

f_{17}



Aux essais pour le Pont de Moulins-lès-Metz, on a pris[39] sur papier bleu l'empreinte des surfaces en contact sous les charges (f_{17}).

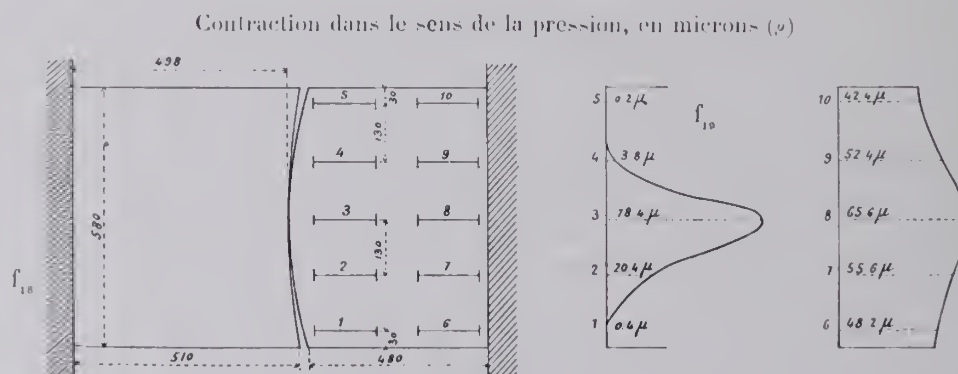
Malgré le soin apporté à leur exécution, elles sont fort irrégulières.

La pression moyenne par $\overline{0^m01}^2$ sur la bande de contact, — charge totale rapportée aux surfaces d'empreinte, — croît d'abord, puis diminue légèrement jusqu'à l'apparition des fissures (f_{17}).

Art. 3. — Expériences de M. Krüger sur des rotules en béton (1906)[40].

Dans le sens de la pression, les fibres centrales se raccourcissent. C'est la fibre passant par le contact qui se raccourcit le plus (f_{18}, f_{19}).

Contraction dans le sens de la pression, en microns (μ)

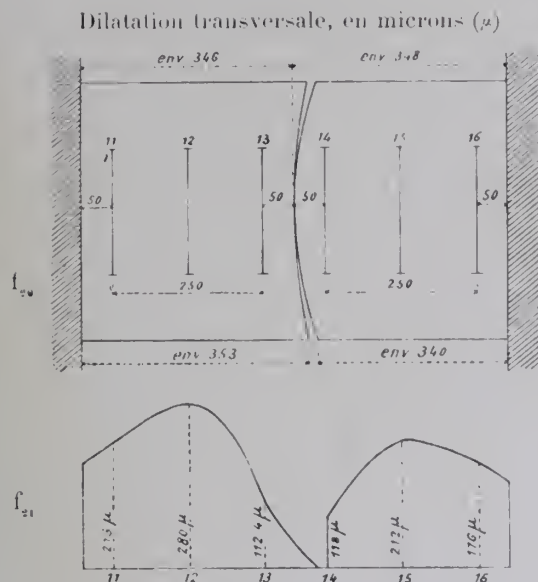


39. — Deutsche Bauzeitung, 1908, 23 mai, p. 283 à 288 ; — 3 juin, p. 303 et 307 : « *Die Anwendung von* « *Gelenken bei Brückenbauten* ». - M. A. Köhler, Ing. Dipl., Directeur technique de la maison Windschild et Langelott, de Cossebaude, pres Dresde.

40. — A l'occasion de la construction du « Dresdener Innundations Viadukt » par l'Administration des Chemins de fer de Saxe. — On a mesuré les déformations au 1 5 de micron $\frac{\mu}{5}$ avec l'appareil optique Martens.

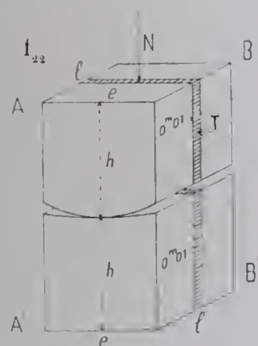
Deutsche Bauzeitung, 1906, p. 219 à 222, 232 à 236, 261 à 264 « *Die Illerbrücken bei Kempten in Allgäu* », M. Colberg.

Dilatation transversale, en microns (μ)



Normalement à la pression, comme toujours dans les prismes comprimés, les sections s'élargissent : il y a tension latérale (f_{20}, f_{21}). C'est elle qui rompt les blocs.

Le rapport : $\dfrac{\text{allongement transversal relatif}}{\text{raccourcissement longitudinal relatif}}$ (coefficient de Poisson)[11] est à peu près 28/100.



On en déduit :

$$T \left(\begin{array}{c} \text{effort de traction sur une tranche} \\ \text{perpendiculaire à l'arête de contact,} \\ \text{de } 0^m01 \text{ d'épaisseur et de hauteur } h \end{array} \right) = 0{,}28\ N \left(\begin{array}{c} \text{compression} \\ \text{par } 0^m01 \text{ d'arête} \\ \text{de contact} \end{array} \right)$$

$$\tau_t \left(\begin{array}{c} \text{effort moyen de traction} \\ \text{par } \overline{0^m01}^2 \end{array} \right) = \frac{T}{h \text{ (en } 0^m01)}$$

Si T est distribué suivant les ordonnées d'une parabole,

$$\text{MAX } \tau_t = \frac{3}{2}\,\frac{T}{h} = 1{,}5 \times \frac{0{,}28\ N}{h} = 0{,}42\,\frac{N}{h}$$

La dilatation maxima, par suite la tension maxima, se produit à une distance du point de contact égale à la moitié de l'épaisseur e du sommier (f_{21}).

Pour qu'il n'y ait pas de tension transversale dans les lits AB, A'B', des sommiers (f_{22}), leur hauteur h sera au moins égale à leur épaisseur e.

C'est vers le milieu que se produisent les plus grandes tensions : si la matière n'y résiste pas assez, c'est ce milieu qu'il faudra armer ou fretter.

11. — Voir plus haut, § 2, art. 1.

Art. 4. — Expériences faites au Laboratoire de l'École des Ponts et Chaussées, à Paris, sur des rotules en porphyre, en calcaire, en béton[42] (1911-1912).

	Rayon du bloc concave en 0^{m}01 R_2	Charge en Tonnes, par 0^{m}01 de génératrice de contact fissurant le bloc — concave $\mathfrak{N}$	convexe $\mathfrak{N}$	Charge en kg $\overline{0^m01}^2$ fissurant des cubes de : 5^{cm} (pierre) 20^{cm} (béton) ξ	Coefficient d'élasticité $E = \varepsilon \times \overline{10}^5$ en kg/$\overline{0^m01}^2$ ε
Porphyre de St Raphaël (Var) $l = h = e = 20^{cm}$	250^c	10^t	12^{t}5	2641^k	6.6 à 8.8
	275^c	8^{t}6	12^{t}2		
	300^c	12^{t}5	10^{t}4		
Calcaire de Ruoms (Ardèche) $l = h = e = 20^{cm}$	250^c	12^{t}5	7^{t}1	1451^k	6.8
	275^c	7^{t}5	5^t		
	300^c	5^t	7^{t}5		

Béton $l = 40^{cm}$ — 500^l sable (St Tropez) 500^l gravier (Cavaou) — Ciment Portland	Eau douce	soit pour 1^v ciment — Sable	Gravier	Rayon R_2	Concave $e = h =$ 40^{cm}	Concave $e = h =$ 20^{cm}	Convexe $e = h =$ 40^{cm}	Convexe $e = h =$ 20^{cm}	ξ	ε
275^k	84^l	2^v	2^v	250^c	4^{t}7	1^{t}8	4^{t}7	2^{t}5	221^k (à 120 j)	2.3 à 2.9
				275^c	1^{t}9	»	3^{t}1	2^{t}5		
				300^c	1^{t}6	3^{t}8	3^{t}5	1^{t}5		
350^k	96^l	1^{v}6	1^{v}6	250^c	3^{t}8	2^{t}5	3^{t}8	»	353^k (à 98 j)	1.8 à 2.6
				275^c	2^{t}1	3^{t}7	2^{t}5	3^{t}7		
				300^c	2^{t}5	3^{t}7	3^{t}8	»		
425^k	107^l	1^{v}3	1^{v}3	250^c	6^{t}3	3^{t}0	6^{t}3	3^{t}0	366^k (à 92 j)	2.5 à 3.1
				275^c	4^{t}5	3^{t}4	3^{t}8	»		
				300^c	2^{t}5	2^{t}0	2^{t}5	»		
500^k	119^l	1^{v}1	1^{v}1	250^c	4^{t}6	3^{t}1	4^{t}1	3^{t}1	363^k (à 85 j)	2.5 à 2.9
				275^c	3^{t}5	4^{t}4	3^{t}5	4^{t}4		
				300^c	2^{t}8	»	Pas de fissure	5^{t}0		

Les blocs se sont, en général, fendus parallèlement à la face A B C D (f_{23}).

Pour le porphyre, et surtout le béton, les bandes de contact étaient fort irrégulières.

Voici pour celles qui étaient à peu près rectangulaires, les largeurs mesurées et calculées :

		Porphyre de St Raphaël ($\varepsilon = 8$)			Calcaire de Ruoms ($\varepsilon = 6{,}8$)		
Rayon R_2		275^{cm}		300^{cm}	275^{cm}		300^{cm}
Charge N en kg par 0^{m}01 de longueur d'arête..		5000^k	10000^k	10000^k	5000^k	10000^k	10000^k
Largeur $2x$ en 0^{m}01 de la bande de contact	mesurée.............	7^{c}6	13^c	11^c	10^{c}5	13^c	13^c
	calculée par la formule de : Hertz ...... (§ 2, art. 2)	6^{c}5	9^{c}2	8^{c}3	7^c	9^{c}9	9^c
	Barkhausen. (§ 2, art. 4)	9^{c}6	12^{c}8	10^{c}6	10^c	13^c	12^{c}4
	Köpcke..... (§ 2, art. 3)	13^c	16^{c}4	15^{c}3	13^{c}7	17^{c}3	16^{c}2
Rapports	$\dfrac{2x}{\sqrt{N}}$	*0,107*	*0,13*	*0,11*	*0,14*	*0,13*	*0,13*
	$\dfrac{\overline{0{,}0096}^2\, N}{4x^2\left(\dfrac{1}{R_1} - \dfrac{1}{R_2}\right)} = \varepsilon$ (formule de Hertz)	*5,8*	*4,0*	*4,6*	*3,1*	*4,0*	*3,3*

42. — Je les ai demandées pour déterminer les rotules de deux passages supérieurs articulés, en béton, à construire sur la ligne de Miramas à l'Estaque.

Expériences sur des rotules, faites à l'École des Ponts et Chaussées (1911-1912)

Empreintes des surfaces de contact

Porphyre

de St Raphaël

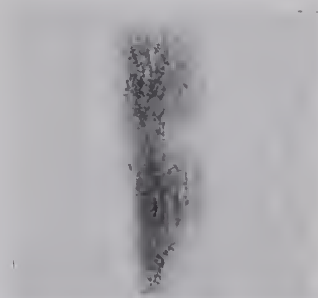
$R_1 = 200^{cm}$

$R_2 = 275^{cm}$

$e = h = l = 20^{cm}$

(Voir f_{23})

2 T 5



5 T



7 T 5



10 T



12 T 5



15 T



Calcaire de Ruoms $R_1 = 200^{cm}$ $R_2 = 300^{cm}$ $e = h = l = 20^{cm}$ (Voir f)

2 T 5



5 T



10 T



12 T 5



Béton

Ciment Portland....	350k
Sable de St Tropez..	500l
Gravier du Cavaou..	500l
Eau douce..........	96l

$R_1 = 200^{cm}$

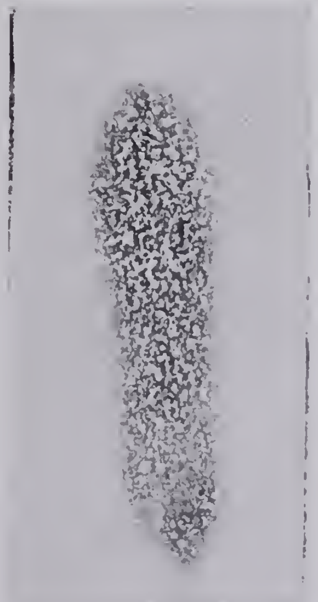
$R_2 = 300^{cm}$

$e = h = 20^{cm}$

$l = 40^{cm}$

(Voir f)

1 T 25



2 T 5

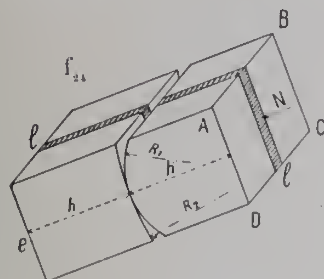


3 T 75



Le nombre en haut à gauche de chaque empreinte est la charge N en Tonnes par 0^m01 d'arête de contact.

Art. 5. — Que conclure des formules et des essais de laboratoire pour déterminer les dimensions des sommiers ?



On veut articuler une voûte.

Pour chaque paire de sommiers, on calcule la charge normale F qui s'exerce sur l'appui tel que ABCD (f_{24}).

On a donc : $N = \frac{F \text{ (en kg)}}{l \text{ (en } 0^m01)}$ (charge normale par 0^m01 d'arête de contact)

On a déterminé, pour le « matériau » des sommiers, ses caractéristiques : l'effort ξ en $kg/\overline{0^m01}^2$ qui l'écrase, taillé, ou moulé en cubes, – et son coefficient d'élasticité $\varepsilon \times \overline{10}^5$ ($kg/\overline{0^m01}^2$).

Quelles dimensions (e, h, l), quels rayons R_1, R_2, faut-il adopter pour que N soit le 1/4, le 1/5, de la charge $\mathfrak{N}$ qui rompt le sommier ?

Les formules de Hertz, qui paraissent les plus solides de celles proposées, ont assez mal résisté à l'expérience.

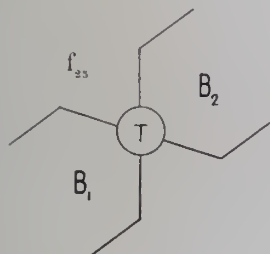
Les essais de laboratoire n'y suppléent pas : ils sont peu nombreux, ne concluent pas. Il en faut d'autres.

A leur défaut, nous essayerons de déduire quelque chose des voûtes faites.

De suite, je puis dire qu'il faut encore être très prudent et, avant de se décider, essayer le « matériau » et les rayons des rotules.

CHAPITRE III

ARTICULATIONS TOURNANTES [43]

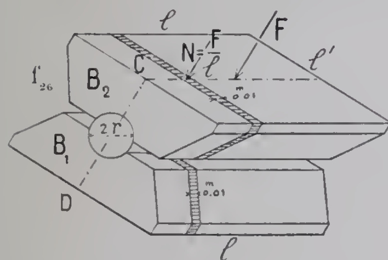


§ 1. — *PRINCIPE*

Deux balanciers B_1 B_2 tournent autour d'un tourillon T en fonte ou en acier (f_{25}).

§ 2. — *CALCULS*

Art. 1. — Diamètre du tourillon. — Soient (f_{26}) :



l, l', la longueur et la largeur en 0^m01 de la face supérieure du balancier B_2 ;

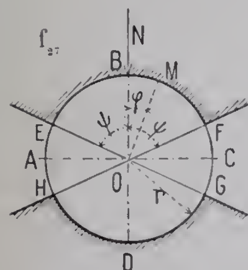
r le rayon du tourillon en 0^m01 ;

F la charge totale en Kg sur le balancier B_2 ;

N la charge en Kg par 0^m01 de longueur du tourillon :

$$N = \frac{F}{l};$$

β la compression permise en $kg/\overline{0^m01}^2$ sur le métal du tourillon.



N se distribue (f_{27}) sur une partie EBF, GDH des 1/2 circonférences ABC, ADC ; elle tend à aplatir le tourillon suivant BD, à l'élargir suivant AC.

Si on l'étale uniformément sur la section diamétrale AOC, on a une compression β' ($Kg/\overline{0^m01}^2$) $= \frac{N}{2r}$

43. — « *Zapfengelenke* » des Ingénieurs allemands.

On calcule r par la formule pratique : $\beta' = \frac{N}{2r} = K\beta$

On se donne K. M. Résal accepte $K = \frac{1}{4}$ [44]. Un calcul, discutable [45], — des expériences, à contrôler [16], permettraient plus.

Art. 2. — Dimensions des balanciers.

— On les calcule comme encastrés dans le plan C D (f_{26}), supportant l'effort $\frac{F}{2}$ à $\frac{l'}{2}$ du plan C D.

§ 3. — *ESSAIS DE M. LE PROFESSEUR FÖPPL A MUNICH* [17],

44. — « *Cours de Ponts métalliques* », Béranger, Paris 1908, Tome I, p. 477.

45. — N se distribue (f_{27}) en une série de pressions élémentaires telles que : β_φ (pression par $\overline{0^m01}^2$ en M) $\times\, ds = \beta_\varphi\, r d\varphi$
Sa composante verticale est $r\beta_\varphi \cos\varphi\, d\varphi$. — Il ne paraît pas interdit de supposer avec M. Bach *, que :

$$\beta_\varphi = \beta_0 \text{ (pression par } \overline{0^m01}^2 \text{ en B, laquelle y est maxima) } \times \cos\varphi$$

Supposons encore que N se répartisse, non sur la 1/2 circonférence A B C, mais seulement sur un arc E B F = 2ψ :

$$N = \beta r \int_{-\psi}^{+\psi} \cos^2\varphi\, d\varphi = \beta r \left(\psi + \frac{1}{2}\sin 2\psi\right)$$

Enfin, si, comme l'admet M. Müller-Breslau * *, E B F est le 1/4 de la circonférence, $2\psi = \frac{\pi}{2}$:

$$N = \beta r\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right) = 1{,}2854\,\beta r \quad \text{ou} \quad \beta' = \frac{N}{2r} = 0{,}64\,\beta$$

* C. Bach — *Maschinen Elemente*, p. 402. * * Müller-Breslau — Vorlesung in Berliner Polytechnikum — *Eiserne Brucken*, p. 39.

46. — M. Bobrowsky a déterminé, sur des tourillons d'un acier de limite d'élasticité β_e, la compression limite par 0^m01 de longueur N_e, à partir de laquelle les déformations du tourillon sont permanentes ; soit, par $\overline{0^m01}^2$ de la section diamétrale, une compression limite $\beta'_e = \frac{N_e}{2r}$

Il a trouvé : Kg $\overline{0^m01}^2$	1er essai	2e essai	3e essai
Limite d'élasticité de l'acier en cubes . . . . β_e	1910^k	2680^k	3400^k
Compression de la section diamétrale au moment où commence la déformation permanente β'_e	2470	3330	4200
Rapport $\frac{\beta'_e}{\beta_e}$	*1,29*	*1,24*	*1,23*

c'est-à-dire que β'_e serait en moyenne $\frac{5}{4}\beta_e$ — Attendons d'autres expériences.

Der Eisenbau, — décembre 1912, p. 447. « *Berechnung der Kippzapfen von Bruckengelenken* », S. Bobrowsky.

47. — Charge par $\overline{0^m01}^2$ de surface diamétrale du tourillon		50^k	100^k	200^k	300^k	400^k	500^k	600^k
Coefficient de frottement fonte sur acier	sans graissage	0,235	0,223	0,216				
	avec graissage : à l'huile de machine		0,191	0,192				
	à la graisse de machine		0,171	0,162	0,148			
	au suif		0,015	0,0075	0,0064	0,0048	0,0046	0,0039
	à la stéarine		0,022	0,013	0,010	0,0075	0,006	0,005
	à 1 p. suif, 3 p. stéarine		0,011	0,0046	0,0042	0,0040	0,0038	0,0033
	à la paraffine		0,0062	0,0051	0,0036	0,0027	0,0026	0,0025
Epaisseur en *mm* de la couche de lubrifiant, avec graissage :	à l'huile de machine / à la graisse de machine	*Epaisseur initiale*	trop mince en fin d'expérience pour la mesurer. On la constatait seulement au toucher.					
	au suif	0,8	0,3					0,1
	à la stéarine	0,9		0,9				0,25
	à 1 p. suif, 3 p. stéarine	1,1	0,1					0,1
	à la paraffine	1,1	0,1					0,1

(Centralblatt der Bauverwaltung 24 août 1901, p. 197, 198. « *Reibung in Bruckengelenken.* » A. Föppl — Munich — Janvier 1901).

A titre de comparaison, voici ce qu'ont donné des essais faits en 1909 à Paris, au Laboratoire de l'Ecole des Ponts et Chaussées en vue de la construction par la Cie P-L-M, du pont tournant de Caronte (Ligne de Miramas à l'Estaque).

Charge par $\overline{0^m01}^2$ de surface diamétrale du tourillon		74^k	112^k	148^k	215^k	280^k
Coefficient de frottement acier sur bronze	sans graissage	0,172	0,166	0,167	0,168	0,172
	avec graissage : à l'huile de machine	0,148	0,116	0,112	0,145	0,150
	à la graisse de machine	0,134	0,128	0,129	0,130	0,129
	à la paraffine	0,024	0,017	0,013	0,011	0,009

AU LABORATOIRE D'ESSAIS DE MATÉRIAUX (1901)

1° – Le coefficient de frottement de fonte sur acier diminue quand la pression augmente.

Il y a donc intérêt à augmenter celle-ci : donc à réduire la surface d'appui ; donc à employer des tourillons de petit diamètre.

2° – Le meilleur lubrifiant est la paraffine.

3° – Sous les plus fortes pressions, il subsiste, entre les tourillons et les coussinets, une mince couche de lubrifiant.

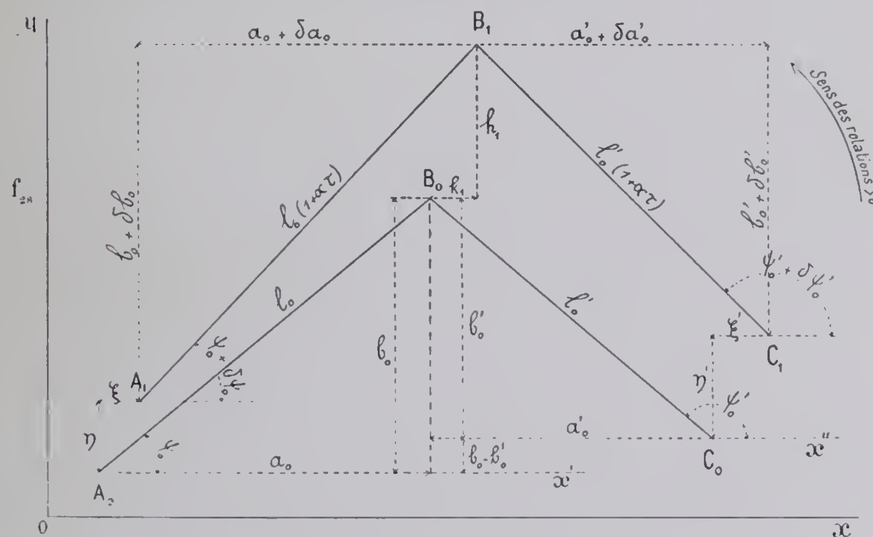
§ 4. — *ROTATIONS AUTOUR DES APPUIS, MOUVEMENTS DE LA CLEF POUR UN CHANGEMENT DE TEMPÉRATURE ET UN DÉPLACEMENT DES APPUIS* (f_{25}).

Art. 1. — Comment change la ligne $A_0 B_0 C_0$ des 3 articulations.

Je suppose, par rapport à une température initiale, un changement de $\tau°$. Chaque dimension linéaire l_0 devient $l_0 (1 + \alpha\tau)$. Les appuis ne varient pas avec $\tau°$.

Mais je suppose de plus que, pour une cause étrangère à $\tau°$, ces appuis se déplacent : horizontalement de ξ, ξ', verticalement de η, η'.

Le triangle primitif $A_0 B_0 C_0$ devient $A_1 B_1 C_1$.



Art. 2. — Conventions pour les signes.

τ est > o pour les élévations de température, < o pour les abaissements.

ξ, ξ' sont > o dans le sens Ox ; η, η' sont > o dans le sens Oy.

Les rotations sont > o de Ox vers Oy.

Art. 3. — Calcul des rotations $\delta\psi_0$. $\delta\psi'_0$.

ψ_0 est l'angle dont il faut faire tourner $A_0 x'$ dans le sens des rotations positives pour l'appliquer sur $A_0 B_0$.

ψ'_0 est l'angle dont il faut faire tourner $C_0 x''$ dans le sens des rotations positives pour l'appliquer sur $C_0 B_0$.

Projetons sur l'horizontale, puis sur la verticale, le contour $A_0 A_1 B_1 C_1 C_0 A_0$.

$$(1) \quad \begin{cases} \xi + l_0 (1 + \alpha\tau) \cos (\psi_0 + \delta\psi_0) - l'_0 (1 + \alpha\tau) \cos (\psi'_0 + \delta\psi'_0) - \xi' - a'_0 - a_0 = 0. \\ \eta + l_0 (1 + \alpha\tau) \sin (\psi_0 + \delta\psi_0) - l'_0 (1 + \alpha\tau) \sin (\psi'_0 + \delta\psi'_0) - \eta' - b_0 + b'_0 = 0. \end{cases}$$

On avait, avant mouvement :

$$(2)\qquad \begin{aligned} a_0 &= l_0 \cos\psi_0 & \qquad a_0' &= -\, l_0' \cos\psi_0' \\ b_0 &= l_0 \sin\psi_0 & \qquad b_0' &= \, l_0' \sin\psi_0' \end{aligned}$$

Développons (1) ; supprimons les infiniment petits du 2[e] ordre ; on trouve, en tenant compte de (2) :

$$(3)\qquad \left\{ \begin{aligned} -\, b_0\,\delta\psi_0 + b'_0\,\delta\psi_0' &= \xi' - \xi - \alpha\tau\,(a_0 + a_0') \\ a_0\,\delta\psi_0 + a'_0\,\delta\psi_0' &= \eta' - \eta - \alpha\tau\,(b_0 - b_0') \end{aligned} \right.$$

D'où :

$$(4)\qquad \left\{ \begin{aligned} \delta\psi_0 &= \frac{a'_0\,(\xi - \xi') - b'_0\,(\eta - \eta') - \alpha\tau\,[b'_0\,(b_0 - b'_0) - a'_0\,(a_0 + a'_0)]}{a'_0\,b_0 + a_0\,b'_0} \\ \delta\psi'_0 &= \frac{-\,a_0\,(\xi - \xi') - b_0\,(\eta - \eta') - \alpha\tau\,[a_0\,(a_0 + a'_0) + b_0\,(b_0 - b'_0)]}{a'_0\,b_0 + a_0\,b'_0} \end{aligned} \right.$$

Art. 4. — Mouvements de l'articulation de clef (f₂₈).

1° vertical h_1. — On a :

$$b_0 + h_1 = \eta + b_0 + \delta b_0 = \eta + l_0\,(1 + \alpha\tau)\sin(\psi_0 + \delta\psi_0) = \eta + b_0 + a_0\,\delta\psi_0 + \alpha\tau b_0$$

d'où :

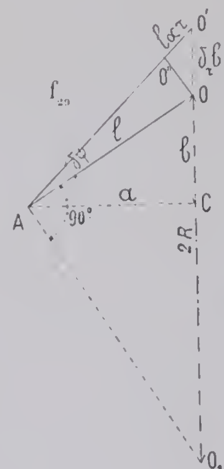
$$h_1 = \eta + a_0\,\delta\psi_0 + \alpha\tau\, b_0$$

2° horizontal k_1. — On a :

$$a_0 + k_1 = \xi + a_0 + \delta a_0 = \xi + l_0\,(1 + \alpha\tau)\cos(\psi_0 + \delta\psi_0) = \xi + a_0 - b_0\,\delta\psi_0 + \alpha\tau\, a_0$$

d'où :

$$k_1 = \xi - b_0\,\delta\psi_0 + \alpha\tau\, a_0$$



Si les 2 appuis sont au même niveau ($b_0 = b'_0 = b$), symétriques ($a_0 = a'_0 = a$), et fixes ($\xi = 0$, $\eta = 0$; $\xi' = 0$, $\eta' = 0$), on a :

$$\delta\psi_0 = \alpha\tau\,\frac{a}{b} \qquad\qquad h_1 = \delta_\tau b = \alpha\tau\left(b + \frac{a^2}{b}\right) \quad [48]$$

$\delta_\tau\, b$ (f₂₉) est la somme de :

$b\,\alpha\tau$ dilatation de la montée b ;

$\frac{a^2}{b}\,\alpha\tau$ augmentation de montée due à ce que a ne peut s'allonger de $a\,\alpha\tau$ (c'est la dilatation de la longueur $\frac{a^2}{b}$, rayon de courbure de l'ellipse de 1/2 axes a et b).

$\delta_\tau\, b$ peut aussi s'écrire :

$$2\,\alpha\tau\,\frac{a^2 + b^2}{2\,b} = 2\,\alpha\tau\,\mathrm{R} \quad [49]$$

C'est la dilatation du diamètre OO_1 (f₂₉).

48. — Dans ce cas simple, il est facile d'établir directement ces formules (f₂₉).
Le sommet O vient d'abord en O" en tournant de $\delta\psi$ autour de A ; puis, par l'allongement $l\alpha\tau$, vient en O' sur la verticale de O :

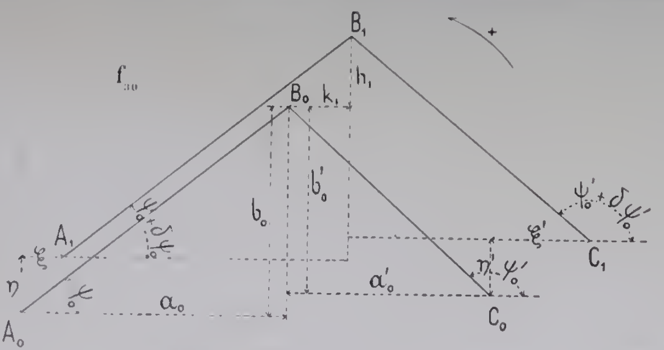
$$O''O' = l\,\alpha\tau \qquad\qquad OO'' = l\,\delta\psi$$

Confondons l'arc avec sa tangente. L'angle O"OA est droit. Les triangles OO"C et AOC sont semblables (les angles O"OA, OO"O' sont droits, et les angles en O et A ont leurs côtés perpendiculaires).

$$\frac{l\,\alpha\tau}{b} = \frac{l\,\delta\psi}{a}, \quad \text{d'où } \delta\psi = \frac{a\,\alpha\tau}{b} ; \qquad\qquad \frac{\delta_\tau b}{l} = \frac{l\,\alpha\tau}{b}, \quad \text{d'où } \delta_\tau b = \frac{l^2\,\alpha\tau}{b}$$

49. — Les 2 triangles rectangles OO"O' et AOO₁ sont semblables :

$$\frac{\delta_\tau b}{2\,\mathrm{R}} = \frac{l\,\alpha\tau}{l} = \alpha\tau, \qquad \text{d'où } \delta_\tau b = 2\,\mathrm{R}\,\alpha\tau$$

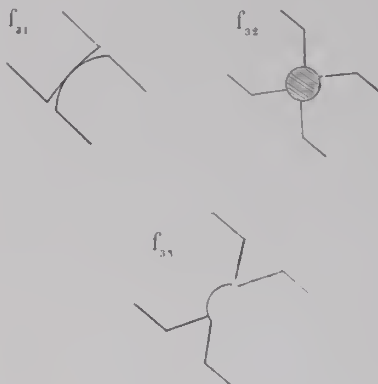


Art. 5. — Formules

Rotations autour des appuis et mouvements de la clef

pour un changement de température τ et un déplacement des appuis (f_{30}).

		Naissances dénivelées b_0 b'_0 — Appuis déplacés de ξ, η ; ξ', η' — $a_0 \gtrless a'_0$	Naissances au même niveau ($b_0 = b'_0 = b$) — Appuis déplacés de ξ, η ; ξ', η' — $a_0 \gtrless a'_0$	Naissances au même niveau ($b_0 = b'_0 = b$) — Appuis déplacés de ξ, η ; ξ', η' — $a_0 = a'_0 = a$	Naissances au même niveau ($b_0 = b'_0 = b$) — Appuis fixes — $\xi = 0$ $\xi' = 0$ $\eta = 0$ $\eta' = 0$; $a_0 = a'_0 = a$
Rotations	$\delta\psi_0 =$	$\frac{a'_0(\xi-\xi') - b'_0(\eta-\eta') + \alpha\tau\,[a'_0(a_0+a'_0) - b'_0(b_0-b'_0)]}{a'_0 b_0 + a_0 b'_0}$	$\frac{a'_0(\xi-\xi') - b(\eta-\eta')}{b(a_0+a'_0)} + \alpha\tau\frac{a'_0}{b}$	$\frac{\xi-\xi'}{2b} - \frac{\eta-\eta'}{2a} + \alpha\tau\frac{a}{b}$	$\alpha\tau\frac{a}{b}$
	$\delta\psi'_0 =$	$\frac{-a_0(\xi-\xi') - b_0(\eta-\eta') - \alpha\tau\,[a_0(a_0+a'_0) + b_0(b_0-b'_0)]}{a'_0 b_0 + a_0 b'_0}$	$\frac{-a_0(\xi-\xi') - b(\eta-\eta')}{b(a_0+a'_0)} - \alpha\tau\frac{a_0}{b}$	$-\frac{\xi-\xi'}{2b} - \frac{\eta-\eta'}{2a} - \alpha\tau\frac{a}{b}$	
Mouvements de la clef	vertical h_1 (↑+) =	$\eta + \frac{a_0[a'_0(\xi-\xi') - b'_0(\eta-\eta')]}{a'_0 b_0 + a_0 b'_0} + \alpha\tau\left\{\frac{a_0[a'_0(a_0+a'_0) - b'_0(b_0-b'_0)]}{a'_0 b_0 + a_0 b'_0} + b_0\right\}$	$\eta + \frac{a_0[a'_0(\xi-\xi') - b(\eta-\eta')]}{b(a_0+a'_0)} + \alpha\tau\left[\frac{a_0 a'_0}{b} + b\right]$	$\frac{a(\xi-\xi')}{2b} + \frac{\eta+\eta'}{2} + \alpha\tau\left[\frac{a^2}{b} + b\right]$	$\alpha\tau\left(\frac{a^2}{b} + b\right)$
	horizontal k_1 (→+) =	$\xi - \frac{b_0[a'_0(\xi-\xi') - b'_0(\eta-\eta')]}{a'_0 b_0 + a_0 b'_0} - \alpha\tau\left\{\frac{b_0[a'_0(a_0+a'_0) - b'_0(b_0-b'_0)]}{a'_0 b_0 + a_0 b'_0} - a_0\right\}$	$\xi - \frac{a'_0(\xi-\xi') - b(\eta-\eta')}{a_0+a'_0} - \alpha\tau\,(a'_0 - a_0)$	$\frac{\xi+\xi'}{2} + \frac{b(\eta-\eta')}{2a}$	0



CHAPITRE IV

ARTICULATIONS A GENOU [50]

Un bloc convexe roule dans un bloc concave de rayon plus grand : c'est une articulation *roulante* (f_{31}).

Deux blocs concaves enserrent un tourillon de même rayon et glissent l'un et l'autre autour de lui : c'est une articulation *tournante* (f_{32}).

Deux blocs, l'un concave, l'autre convexe, de même rayon, tournent en glissant l'un dans l'autre (f_{33}) : c'est une articulation *à genou.*

TITRE IV

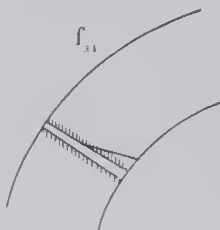
HISTORIQUE

ARTICULER LES VOÛTES EST UNE IDÉE FRANÇAISE

§ 1. — *C'EST DUPUIT QUI A ÉMIS LE PREMIER (EN 1870) L'IDÉE D'ARTICULER LES VOÛTES*

Il y a 43 ans, Dupuit écrivait : [51]

« ..... *il nous semble qu'on peut..... ramener la pression au centre du joint* « (de rupture) *par une disposition* (f_{34}) *qui consisterait à remplacer, du côté de* « *l'intrados, le prolongement du joint par une ligne faisant* « *avec celui-ci un angle très obtus raccordé par une courbe* « *sur laquelle roulerait la voûte au décintrement, si cette* « *partie du joint n'était garnie que d'étoupe. On détermine-* « *rait ainsi un point de passage obligé de la courbe de pres-* « *sion et qui la placerait comme on voudrait par rapport à* « *l'intrados ; on pourrait faire quelque chose d'analogue à la* « *clef. Il n'y aurait plus alors rien d'indéterminé dans le* « *tracé de la courbe de pression, ce qui permettrait de la faire passer par le milieu* « *de tous les joints en faisant varier convenablement le poids de la voûte.... Il est* « *inutile que cette articulation se trouve précisément au joint de rupture, théori-* « *quement elle aurait partout le même effet ; mais de même qu'une ligne droite est* « *d'autant mieux déterminée par deux points qu'ils sont plus écartés entre eux, de* « *même il conviendrait ici d'éloigner ce point de passage de la clef et nous croirions* « *convenable de placer l'articulation dans un point accessible après le décintrement...*



50. — « *Umschliessungsgelenke* » des Ingenieurs allemands.

51. — « *Traité de l'équilibre des voûtes et de la construction des ponts en maçonnerie* » par J. Dupuit, Inspecteur Général des Ponts et Chaussées. — Paris, Dunod, 1870, p. 195, 196, 197.

« La voûte étant ainsi construite, la rotation au moment du décintrement se
« ferait nécessairement autour du point de contact, qu'on pourrait placer de 2 ou 3
« centimètres en arrière du centre du joint.... Il est évident que les deux pierres en
« contact seraient dans des conditions bien plus favorables à la résistance que dans
« le système de la pose ordinaire.... D'ailleurs,.... rien n'empêcherait de prendre
« pour ces deux rangs de voussoirs des pierres d'une qualité excessivement dure.....
« Remarquons même que la pose de ces deux voussoirs de chaque côté de la voûte
« ayant pour résultat de faire passer la courbe de pression par le milieu de tous les
« autres, permettrait d'employer pour ceux-ci des matériaux moins résistants que
« ceux qu'on s'impose aujourd'hui dans l'indécision où on se trouve pour le passage
« de la courbe de pression...

« Il n'est pas sans exemple,... dans les constructions publiques de voir des
« pierres supportant des charges énormes ; dans les ponts métalliques les poutres ou
« les arcs reposent sur les pierres des culées et des piles ;.... les portes gigantesques
« des écluses à la mer, les ponts tournants reposent sur des pivots qui transmettent
« leur pression à des pierres de taille. Ces pierres résistent parfaitement aux
« pressions considérables qui leur sont transmises, parce que ces pressions ont lieu
« seulement sur la partie centrale de leur surface. On pourrait d'ailleurs augmen-
« ter cette résistance en intercalant au point de contact des plaques de fonte encas-
« trées dans les deux voussoirs, de manière que la surface métallique remplacerait
« celle de la pierre.... »

Dupuit a donc formellement prévu la réduction de surface des appuis [52], la triple articulation roulante, les sommiers en pierre dure, en fonte [53].

52. — En 1878, M. Brosselin, alors Ingénieur ordinaire des Ponts et Chaussées, proposait (*Note sur la construction des ponts en maçonnerie*, Paris 15 décembre 1878, Bibliothèque de l'École des Ponts et Chaussées : C. 705, - 12538) de placer, à la clef et aux joints de rupture des voûtes, deux assises de voussoirs en pierre de taille résistante, d'y faire un joint de hauteur réduite à ciment pur, à mortier riche, au plomb, à l'étain.

Pour la voûte centrale du pont de Tolbiac à Paris, alors en projet (Portée, 35m20, montée, 8m25), il indiquait les épaisseurs de 0m75 à la clef, 0m90 au milieu de la montée ; voûte en meulière à ciment ; sommiers en pierre de taille de Souppes ; entre eux, joints en ciment pur sur la moitié de l'épaisseur de la voûte, travaillant : au décintrement, à 140 ou 150k ; aux épreuves, à 250 ou 300k.

Ces indications n'ont pas été suivies : les voûtes du pont de Tolbiac sont inarticulées.

Le projet de M. Brosselin a été rappelé dans deux mémoires :

1° - *Note sur la construction récente en Allemagne de ponts en maçonnerie avec articulations à la clef et aux joints de rupture* » par M. G. La Rivière, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

Annales des Ponts et Chaussées, 1891, I, p. 899 à 940, Pl. 46 à 48.

2° - « *Ponts en maçonnerie, articulés aux naissances et à la clef* » par M. Bourdelles, Inspecteur Général des Ponts et Chaussées.

Annales des Ponts et Chaussées, 1898, III, p. 31 à 92.

53. — Le Président Leibbrand l'a très explicitement reconnu. En raison de son importance, je donne ici le texte même de sa déclaration :

. . . .

« Schon seit langer Zeit wurden deshalb von Dupuis (Dupuit) *andere Vorschläge gemacht welche bewirken*
« sollten, dass die Resultante der inneren Kräfte in den Bruchfugen sich möglichst wenig von der Mitte
« derselben entferne ; die Abschrägung dieser Fugen, die geradlinige oder bogenförmige Erweiterung
« derselben nach aussen ohne und mit gleichzeitiger Anbringung von Metalldollen zur Verhütung der
« Verschiebung der Gelenksteine, die Verstärkung dieser Fugen durch bleibende Metalleinlagen von
« einer Drehbewegung zulassenden Form, die Einlegung bleibender cylindrischer Eisengelenke, das
« Einfügen provisorischer Eisengelenke, welche nach dem Ausschalen des Gewölbes wieder beseitigt
« werden sollten, wurden als Mittel zur Verhütung von Rissen und zur Festlegung der Druckkurven
« bezeichnet... »

Fortschritte der Ingenieurwissenschaften . « *Gewölbte Brücken* » von Karl Leibbrand, Leipzig, 1897, p. 42.

Traduction :

. . . .

« Depuis longtemps déjà, d'autres propositions avaient été faites par Dupuit, pour arriver à ce que la
« résultante des forces intérieures s'écartât le moins possible de l'axe aux joints de rupture, diminution
« de ces joints par chanfreinage des arêtes, suivant des surfaces planes ou courbes, avec ou sans introduc-
« tion de goujons métalliques pour empêcher le déplacement de l'articulation ; renforcement de ces joints
« au moyen de dispositifs permanents en métal, de forme convenable pour permettre la rotation ; intro-
« duction de rotules cylindriques permanentes en fer ou d'articulations métalliques provisoires à supprimer
« après décintrement ; autant de moyens indiqués pour empêcher les fissures et fixer les courbes de
« pression.... »

§ 2. — *APPLICATION EN ALLEMAGNE, APRÈS 1880, DE L'IDÉE DE DUPUIT*

C'est Köpcke de Dresde qui, en 1880, a exécuté les premières articulations roulantes [54] : c'est le Président Leibbrand qui, en 1885, a articulé la première voûte sur plomb à Höfen [55] (Wurtemberg).

Les articulations tournantes ont été employées pour la première fois, en 1895, par M. Max Leibbrand au pont d'Inzigkofen [56].

TITRE V

CLASSEMENT DES VOÛTES ARTICULÉES

§ 1. — *CLASSEMENT DES VOÛTES ARTICULÉES SUIVANT LE TYPE D'ARTICULATION*

Quel que soit leur intrados, les voûtes articulées sont toujours en arc surbaissé entre leurs articulations de retombées.

Une voûte articulée en plein cintre, en ellipse, en arc peu surbaissé, est, en réalité, une voûte en arc surbaissé avec culées en surplomb.

Je conserverai les symboles des voûtes inarticulées pour désigner l'intrados, le nombre d'arches, la voie portée.

Mais, pour les voûtes articulées, le caractère dominateur n'est plus la courbe d'intrados : c'est le type d'articulation.

Elles seront donc classées d'abord d'après ce type, dans l'ordre suivant et avec les symboles que voici sous celui de l'intrados :

Bandes de plomb : ├───┼───┤

Articulations roulantes : ⟝───⟝───⟝

Articulations tournantes : o───o───o

Articulations à genou : (───)───)

§ 2. — *DISTINCTION ENTRE LES VOÛTES* « SEMI-ARTICULÉES » *C-A-D ARTICULÉES TEMPORAIREMENT, AU POIDS MORT SEULEMENT, LES ARTICULATIONS ÉTANT CONDAMNÉES AVANT L'OUVERTURE A LA CIRCULATION, ET LES VOÛTES* « ARTICULÉES » *C-A-D DE FAÇON PERMANENTE, SOUS LE POIDS MORT, LES SURCHARGES, POUR LES VARIATIONS DE TEMPÉRATURE,....*

Dans nombre d'ouvrages on a, après achèvement et avant l'ouverture à la circulation, condamné les articulations.

La voûte est alors articulée seulement pour le poids mort.

54. — a un pont près de Langenhennersdorf (Saxe), ligne de Pirna à Bergiefshübler. - 3 voûtes en arc : portée, 13^{m} ; montée, 3^{m} ; épaisseurs : à la clef, 0^{m}50 ; aux retombées, 0^{m}66. — Rayons des surfaces en contact : 1105^{mm} et 977^{mm}.

(Zeitschrift des Architekten-und Ingenieur Vereins zu Hannover, 1888, Heft 4, p. 374 à 380. « *Über die Verwendung von drei Gelenken in Steingewölben* » von Geh. Finanzrath C. Köpcke, zu Dresden.

55. — A[1] r^{te} ($\geqslant$ 40^{m})^{I}, Tome IV, Livre II

56. — A[1] r^{te} ($\geqslant$ 40^{m})^{I}. Tome IV, Livre II

La courbe de pression du poids mort passe par les articulations, mais les surcharges et les variations de température la déplacent.

Ces voûtes seront dites « *semi-articulées* ».

Elles ont les symboles des voûtes articulées, mais avec une barre sur le signe de l'articulation :

Bandes de plomb : ⊢—⊢—⊣ (barrés)

Articulations à genou : ⟵⟶ (barrés)

Ces voûtes, qui se rapprochent des voûtes inarticulées, seront décrites les premières.

§ 3. — *SÉRIES DANS LESQUELLES ONT ÉTÉ CLASSÉES LES VOÛTES ARTICULÉES* ⩾ 40m

Les voûtes à 3 articulations seront donc classées : d'abord en voûtes semi-articulées et voûtes articulées ; puis, dans chacune de ces divisions, d'abord d'après le type d'articulation ; enfin, comme les voûtes inarticulées, par intrados, nombre d'arches, voie portée.

Pour les voûtes de 40m et au-dessus, voici les séries :

I. — Voûtes ⩾ 40m semi-articulées,

c'est-à-dire articulées temporairement, au poids mort seulement, articulations condamnées avant l'ouverture à la circulation.

Types d'articulations	Ponts en arc très surbaissé — à une seule grande arche — sous route	Ponts en arc très surbaissé — à une seule grande arche — sous chemin de fer à voie normale	Ponts en arc très surbaissé — à plusieurs grandes arches sous route
sur plomb	$\overline{\mathbf{A}}^1$ r^{te} (⩾ 40m)	»	»
à genou	$\overline{\mathbf{A}}^1$ r^{te} (⩾ 40m)	$\overline{\mathbf{A}}^1$ F^{r} (⩾ 40m)	$\overline{\mathbf{A}}^n$ r^{te} (⩾ 40m)

II. — Voûtes ⩾ 40m articulées,

c'est-à-dire de façon permanente, sous le poids mort, les surcharges, pour les variations de température,...

Types d'articulations	Ponts en ellipse à plusieurs grandes arches sous chemin de fer à voie normale	Ponts en arc peu surbaissé à une seule grande arche sous chemin de fer à voie normale	Ponts en arc très surbaissé — à une seule grande arche — sous route	Ponts en arc très surbaissé — à une seule grande arche — sous chemin de fer à voie normale	Ponts en arc très surbaissé — à plusieurs grandes arches sous route
sur plomb	$\mathbf{E}^n$ F^{r} (⩾ 40m)	»	»	»	»
roulantes	$\mathbf{E}^n$ F^{r} (⩾ 40m)	$\overset{\frown}{\mathbf{A}}{}^1$ F^{r} (⩾ 40m)	$\overline{\mathbf{A}}^1$ r^{te} (⩾ 40m)	$\overline{\mathbf{A}}^1$ F^{r} (⩾ 40m)	$\overline{\mathbf{A}}^n$ r^{te} (⩾ 40m)
tournantes	»	»	$\overline{\mathbf{A}}^1$ r^{te} (⩾ 40m)	»	»

LIVRE II

DESCRIPTION DES PONTS

QUI ONT OU AVAIENT

DES

VOÛTES ARTICULÉES

DE 40^{m} ET PLUS DE PORTÉE

TABLEAUX SYNOPTIQUES

MONOGRAPHIES

VOÛTES

SEMI-ARTICULÉES

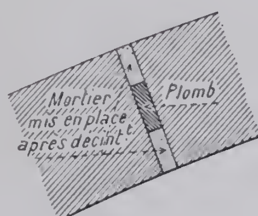
C'EST-A-DIRE ARTICULÉES TEMPORAIREMENT
AU POIDS MORT SEULEMENT
ARTICULATIONS CONDAMNÉES
AVANT L'OUVERTURE A LA CIRCULATION

VOÛTES SEMI-ARTICULÉES [1]

ARTICULATIONS

SUR

PLOMB



Symbole : [1]

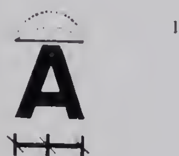


1. — Pour cette définition et le sens du symbole, voir Tome IV, Livre I, p. 28 et 29.

VOÛTES SEMI-ARTICULÉES [1]

ARTICULATIONS SUR PLOMB [1]

ARCS TRÈS SURBAISSÉS [1]



PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS ROUTE

Série A[1] r^te (⩾ 40^m) [1]

1. — Pour le classement des voûtes articulées et le sens des symboles, voir Tome IV, Livre I, p. 28 et 29.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

PONT	PROJET							
	ENSEMBLE		GRANDE VOÛTE					
PONT — Date — Symbole	*Longueur* *entre abouts des parapets* — Déclivités — Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets — *entre tympans sous la plinthe* — Fruit des tympans — Revanche de la chaussée sur l'extrados	INTRADOS — Portée — *Montée* — Surbaissement — *Rayon*	ÉPAISSEURS — CORPS ET TÊTES — Clef — *Retombées*	BANDES DE PLOMB — *Épaisseur* — Largeur — Clef — *Retombées* — *Pour les pressions, voir Tome IV, Livre III.*	MATÉRIAUX — *Mortier* — *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg $\overline{0^{m}01}^2$ — *Hypothèse adoptée* — Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENT DES TYMPANS — 2° *DÉCORATI[ON] DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Höfen** *Wurtemberg* 1885 — A[1] r^{te} (> 40m) 1	*35m 60* — 20mm — 5m85	3m,90 — *3m 40* — Pas de fruit — 0m55	Sur le sol de fondation, Portée : **41m,00** — Au-dessus du sol, Arc de cercle **28m,00** — *2m 80* — $\frac{1}{10} = 0,10$ — *36m 40*	**1m,00** — *1m,50*	*20mm* — 35cm — *50cm*	PT[1] — Grès (917k à 1036k) — *Ciment Portland de Blaubeuren* *0mc 666*	Pressions maxima : — Clef : 29k — Joint de rupture : 22k — Retombées : 24k	1° Aux rei[ns] 6 voûte[s] transversa[les] vues, en plein ci[ntre] de 1m40 sur pile[s] de 0m70 — Au cerveau évidemen[t] longitudi[nal] — 2° »
de **Marbach** *Wurtemberg* 1886-1887 — A[1] r^{te} (> 40m) 2	*41m 70* — 20mm 20mm — 7m55	6m 20 — *5m 60* — Pas de fruit — 0m55	Sur le sol de fondation, Portée : **43m,50** — Au-dessus du sol, Arc de cercle **32m,00** — *3m 10* — $\frac{1}{10,32} = 0,097$ — *42m 84*	**1m,20** — *1m,50*	*22mm* — 40cm — *50cm*	Bandeaux : PT[1] Keuper (577k à 644k) — Douelle et Queutage : MEV[1] Muschelkalk résistant mal à la gelée et à l'humidité (992k à 1169k) — Sommiers d'articulations : Grès (718k à 768k) — *Ciment — 0mc 500*	Pressions maxima : — Clef : 27k — Joint de rupture : 25k	1° Les tymp[ans] et 2 mu[rs] longitud[inaux] de 0m50 écartés de [...] porten[t] u[ne] plate-for[me] en béto[n] à 1r, 2r, [...] — 2° »
de **Baiersbronn** *Wurtemberg* 1889 — A[1] r^{te} (> 40m) 3	*38m 50* — 5mm — 5m50	6m,60 — *5m 81* — Pas de fruit — »	Sur le sol de fondation, Portée : **40m,00** — Au-dessus du sol, **33m,00** — *3m 30* — $\frac{1}{10} = 0,10$ — »	**0m,60** — *0m,80*	*20mm* — 17cm — *18cm*	PT[1] — Grès bigarré (675k)	Pressions maxima : — Clef : 42k — Joint de rupture : 53k — Retombées : 33k	1° 3 voût[es] longitud[inales] de 1m07 sur mu[rs] de 0m5[0] — 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6.

SÉRIE $\overline{A}^1$ r^te (⩾ 40^m)

TABLEAU SYNOPTIQUE

FONDATIONS Nature du sol Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg : 0m01² *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] { de volume « utile » W [4].
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Grès quarre dur — 2m Pression ...xima : 9k *...paisements dans des ...tardeaux*	Fixe Montants et contrefiches » Boites à sable carrées, en fonte	3 2,5cm 1m35 »	» » 5373f	» » 56f4	A pleine épaisseur à partir des retombées Joints bourrés, après la pose de chaque assise, de mortier à ciment 1v sable 1v5	Voûtes d'évidement en construction *35 jours* »	t_c 2mm (moyenne des 2 têtes) sous le poids de tous les voussoirs am^t / aval (mm) t'_v 42.5 / 38 t''_v (à 28j.) 16.5 / 14.5 $t'_v+t''_v$ 59 / 52.5	Fon-dations / Élé-vation / En-semble D : 9566f / 20638f / 30204f D : S_p : 69f5 / 148f6 / 218f1 D : W : 13f9 / 29f9 / 43f8
...uschelkalk ..., compact, assise — 2m Pression ...xima : 7k »	Cintre du Pont de Teinach $\overline{A}^1$ r^te (⩾ 40^m)[2] (Tome III) Fixe Montants et contrefiches » Boites à sable	5 2,5cm » »	» » 3147f	» » 17f3	2 rouleaux à partir des retombées. Joints en douelle bourrés après la pose de 4 assises à sec.	» *12 jours* »	t_c 72mm t'_v 39mm t''_v 16mm jusqu'à l'achèvement du pont $t'_v+t''_v$ = 55mm	Fon-dations / Élé-vation / En-semble D : 10803f / 29229f / 40032f D : S_p : 42f2 / 112f6 / 154f8 D : W : 7f0 / 18f9 / 25f9
Granit ...ssion : 18k	Fixe Montants et contrefiches		» » 3201f	» » 16f2		» *28 jours* »	t'_v 92mm $t'_v+t''_v$ = 163mm *« par suite de fautes dans la confection des maçonneries »*	Fon-dations / Élé-vation / En-semble D : 3956f / 19132f / 23088f D : S_p : 15f6 / 75f1 / 90f7 D : W : 3f0 / 14f6 / 17f6

...ur le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. 111, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. 111, n° 7 — *B*.

VOÛTES SEMI-ARTICULÉES   ARTICULATIONS SUR PLOMB
ARCS TRÈS SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

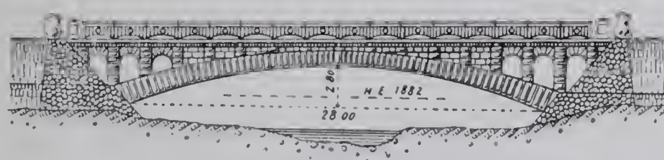
SÉRIE A[1] r^te (⩾ 40^m)

MONOGRAPHIES

PONT SUR L'ENZ, EN AVAL DE HÖFEN[1] (*WURTEMBERG*)

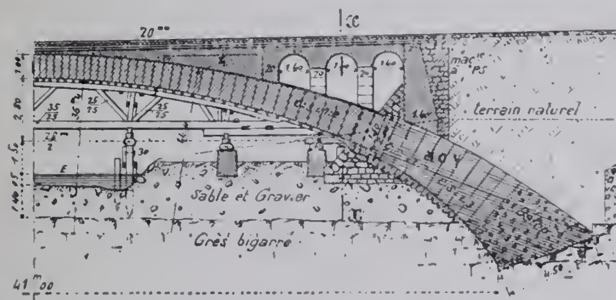
1885   A[1] r^te (⩾ 40^m) 1

f₁ — Élévation — 2^mm

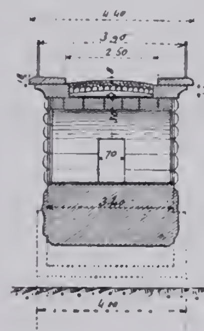


1. Articulations. — C'est un arc en maçonnerie à culées perdues, articulé, pendant sa construction, par des bandes de plomb de 20^mm d'épaisseur, occupant le 1/3 central des joints de clef et de retombées.

f₂ — Demi-coupe en long et cintre — 3^mm



f₃ — Coupe en travers sur xx de f₂ — 5^mm



2. Trottoirs. — Ils sont en encorbellement sur consoles ancrées dans les tympans ; leurs bordures sont protégées par des fers cornières.

1. — Station de la ligne de Pforzheim à Wildbad, à 5^k de Wildbad.

3. Chape. — Le dos de la grande voûte est revêtu de 3^{cm} de mortier de Portland à 1^r 2^r ; – les voûtes d'évidement, de 7^{mm} de feutre asphalté.

La chape, à deux pentes de 2% vers l'axe longitudinal, conduit l'eau sous un fer Zorès qui l'écoule derrière les culées.

4. Ciment employé. — A la traction, le mortier à 1^r de ciment de Blaubeuren pour 3^r de sable normal, après un jour sous l'eau et 6 jours à l'air, devait résister au moins à 8^k3 pour le ciment prompt (employé en fondations seulement), à 12^k4 pour le ciment lent.

5. Cintre. — On a employé les boîtes à sable carrées, en fonte, de 25^c de côté, du pont de Teinach [2].

Le sable, sec, était protégé par une feuille de fer-blanc ; il était, dans les boîtes, de 5^{mm} plus haut qu'au projet.

Les boîtes étaient reliées électriquement à la maison du gardien, qui eût été prévenu de suite d'une descente anormale.

6. Fondations. — Le bas des culées est en béton pilonné à 1^r 3^r 6^r (ciment et grès cassé), avec 30% de pierres (grès) posées suivant le rayon.

Le haut est en moellons ordinaires lités, avec 20% de mortier de ciment employé sec à 1^r 3^r.

La douelle était appuyée sur une forme de pierres sèches recouverte de mortier de ciment.

7. Exécution de la voûte. — On chargea le cintre de tous les voussoirs : les appuis tassèrent de 1 et 3^{mm}.

Puis on posa les bandes de plomb des retombées [3] en soutenant leur bord inférieur par 3 chevilles scellées au plomb dans leur sommier, et saillant de 10^{mm}.

On bouchait le joint avec de l'étoupe.

On a construit la voûte en partant des retombées.

On posait une assise de voussoirs sur lattes en bois tendre de $15^{mm} \times 50^{mm}$; on lavait les joints ; puis, on y versait du mortier à l'état de fluide épais (1^r de ciment, 1^r 1/2 de sable), et on l'y enfonçait avec des fers plats.

Aux têtes et en douelle, on bourrait les joints d'étoupe sur 3^{cm} de profondeur.

Pendant la pose des 5 assises voisines des retombées, le joint sec sur plomb s'élargit à l'extrados.

Les 5 dernières assises à la clef furent fermées en même temps.

Après clavage aux retombées, on coula du plomb dans les vides ouverts entre les bandes de plomb et leurs sommiers.

La voûte a été faite en 7 jours 1/4 par deux équipes de 4 maçons et 4 manœuvres.

2. — $\bar{A}^1$ r^{te} ($\geqslant$ 40m)2 — Tome III.

3. — Longueur 1^m05 ; intervalle entre les bandes 0^m10.

8. Décintrement. — Il fut fait en 3 fois par 21 hommes.

	Nombre de jours après clavage	Nombre d'abaissements de 3^mm	Tassements totaux en *mm* amont	Tassements totaux en *mm* aval
1re opération	15	6	19,5	15,5
2e opération	28	3	30	26
3e opération	35	4	42,5	38

On n'observa pas de fissures.

On acheva les voûtes d'évidement, les tympans ; on posa le couronnement.

4 semaines après le décintrement, 9 semaines après le clavage, l'ouvrage étant terminé, le tassement atteignait : à l'amont, 59^mm ; à l'aval, 52^mm5.

Il n'a plus augmenté.

9. Variation en *mm* de l'épaisseur des lames de plomb (épaisseur initiale : 20^mm) (augmentation + ; diminution —).

Largeur des bandes :	Clef 0^m35 amont extr.	Clef amont intr.	Clef aval extr.	Clef aval intr.	Retombées 0^m50 Rive gauche amont extr.	Rive gauche amont intr.	Rive gauche aval extr.	Rive gauche aval intr.	Rive droite amont extr.	Rive droite amont intr.	Rive droite aval extr.	Rive droite aval intr.
après clavage	+ 1	+ 3	— 3	+ 4	+ 9	— 8	+ 6	— 1.5	+ 13	— 6	+ 12	— 2
au décintrement 1re opération	0	+ 1	— 4	+ 4	+ 10	— 8.5	+ 6	— 3	+ 13	— 7.5	+ 12	— 3
au décintrement 2e —	0	+ 1.5	— 4.5	+ 4	+ 10	— 9	+ 6.5	— 4	+ 13	— 8	+ 12	— 3.5
au décintrement 3e —	— 1	+ 2.3	— 5.5	+ 4.8	+ 10.5	— 9.5	+ 6.5	— 4.5	+ 13.6	— 8.5	+ 12.4	— 4.1
après achèvement du pont	— 1.4	+ 2.3	— 5.7	+ 4.7	+ 10.3	— 9.5	+ 6.3	— 4.6	+ 13.4	— 8.9	+ 12.2	— 4.3

A la clef, les bandes de plomb restèrent constamment en contact sur toute leur largeur avec les moellons.

Si le centre de pression est au 1/6 supérieur de la bande, la pression maxima est : sur l'arête supérieure, 124^k ; sur la maçonnerie, 29^k1.

Aux retombées, les bandes de plomb ne portaient plus à l'extrados et ne portaient que sur 35^cm à l'intrados.

Dans le cas le plus défavorable, la pression maxima sur l'arête inférieure du plomb est 134^k3, et, sur la maçonnerie, moins de 23^k8.

10. Comment on a condamné les articulations. — L'ouvrage achevé, les joints vides ont été remplis de mortier de ciment.

11. Épreuves.

	Tassements à la clef en *mm*, le rouleau			
	passant vite		immobile	
	amont	aval	amont	aval
Rouleau compresseur.. vide : 5 T 4.......	0,2	0,3	0,15	0,15
Rouleau compresseur.. chargé : 11 T....	de 0,4 à 0,65	de 0,4 à 0,8	0,35	0,35

Pas de tassement permanent.

12. Dépenses [1].

Fondations (*partie cachée*)	Fouilles et épuisements........................	4.178f	9.566f
	Béton et maçonnerie de moellons ordinaires lités	4.980f	
	Pierres sèches et divers.......................	408f	
Élévation (*partie vue*)	Charpentes et cintres..........................	5.373f	20.638f
	Maçonnerie..................................	11.542f	
	Garde-corps (43f le mètre-courant)...	2.295f	
	Plomb..	617f	
	Asphalte, fers (cornières des bordures, ancrage), divers........	811f	
	Dépense totale.........		30.204f

13. Personnel.

Projet : M. Leibbrand, « Kgl. Ober-Baurath ».

Travaux : *Direction générale :* M. Stuppel « Königl. Bauinspector » à Calw.
Conduite : M. Paul Braun, « Königl. Regierungs-Baumeister ».

1. — 1 Mark = 1f23.

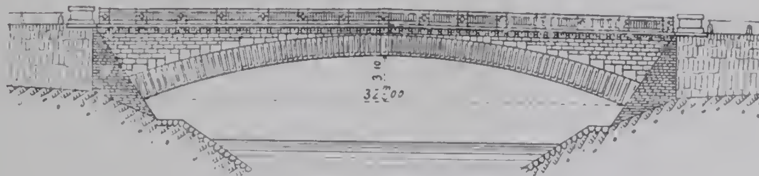
SOURCE :

S1. — Zeitschrift für Bauwesen 1888, p. 235 à 260, Pl. 38 à 40 : « *Steinbrücken mit* « *gelenkartigen Einlagen* » ; - p. 242 à 250, Pl. 38 : « *Brücke über die Enz bei Höfen* », - Stuttgart, novembre 1887, Leibbrand, Kgl. Ober-Baurath.

PONT SUR LA MURR, PRÈS DE MARBACH[1] *(WURTEMBERG)*

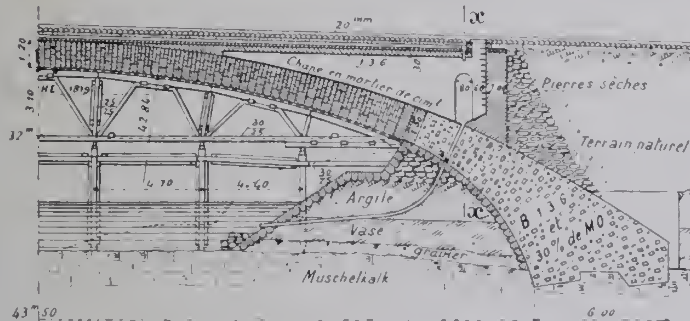
1886-1887 A[1] r[le] (> 40m)2

f₁ — Élévation — 2mm

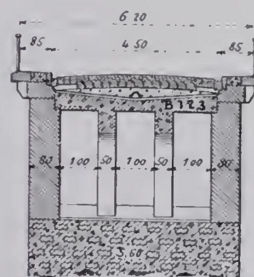


1. Articulations. — C'est un arc en maçonnerie à culées perdues, articulé, pendant sa construction, par des bandes de plomb de 22mm occupant le 1/3 central des joints de clef et de retombées.

f₂ — Demi-coupe en long et cintre — 3mm



f₃ — Coupe en travers sur xx de f₂ — 5mm



2. Plinthes. — Les plinthes, en grès, sont en encorbellement sur consoles ancrées.

3. Chape. — On a étendu sur le dos de la voûte une couche de mortier à 1v 2v ; et, sur la plate-forme que portent les murs d'élégissement, un feutre asphalté de 7mm.

4. Matériaux des culées. — Pour aller plus vite, on les a faites en béton (ciment 1v, sable 3v, pierre cassée calcaire et gros gravier 6v, et 30 % de moellons calcaires).

Le béton résistait à la compression, à 5 mois, en cubes de 30cm d'arête :	avec gravier	avec muschelkalk cassé au lieu de gravier
avec ciment prompt (sous l'eau)	86k à 107k	»
avec ciment lent (au-dessus de l'eau)	121k à 135k	119k à 151k

1. — Au confluent de la Murr et du Neckar. Station de la ligne de Bietigheim à Backnang, à 12km de Bietigheim.

5. Cintre. — On a réemployé celui du pont de Teinach sur la Nagold[2], construit 5 ans avant.

Sous la moitié des matériaux de la voûte, il tassa irrégulièrement, soit parce que les bois étaient pourris, soit parce que ses appuis ont cédé.

On le déchargea, puis on le redressa.

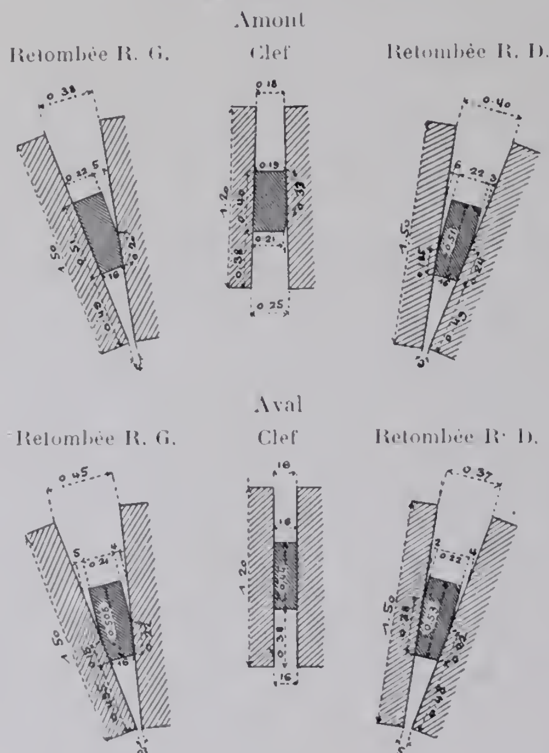
6. Exécution de la voûte. — A partir des retombées, la voûte a été construite en 21 jours en deux rouleaux.

En douelle, on posait 4 assises avec joints secs maintenus par des lattes de 20mm ; puis on fichait du mortier (ciment 1v, sable 2v).

Le quentage est en moellons bien équarris.

Pendant la construction, le cintre tassa de 55mm, et il se produisit, à la 1/2 voûte rive droite, quelques fissures que l'on boucha immédiatement.

f_4 — Mouvements des joints d'articulation, au décintrement — 2cm



7. Décintrement. — On décintra en 13 jours, 6 semaines après le clavage.

On n'a pas constaté de fissures, ni de recul des culées.

Les joints sur plomb s'étaient comprimés à l'extrados de la clef et à l'intrados des retombées, et ouverts à l'intrados de la clef et à l'extrados des retombées (f_4).

La pression maxima était, sur l'arête de contact :

à la clef (pour une largeur de 33cm) 72k

aux retombées (pour une largeur de 22cm) 120k

8. Comment on a condamné les articulations. — Deux semaines après le décintrement, les tympans construits, on coula du plomb dans les vides ouverts entre les bandes et les voussoirs, puis on ferma le reste du joint au mortier de ciment à 1v 2v.

9. Dépenses[3].

Fondations *(partie cachée)*	Fouilles et épuisements	4.220^f^	10.803^f^
	Béton	6.583^f^	
Élévation *(partie vue)*	Cintre. — Pont de service	3.147^f^	29.229^f^
	Voûte	9.493^f^	
	Plomb	886^f^	
	Asphalte	390^f^	
	Garde-corps	2.345^f^	
	Maçonnerie au-dessus de la voûte	9.014^f^	
	Divers	3.954^f^	
	Dépense totale		40.032^f^

10. Personnel.

Projet : M. Leibbrand, « Kgl. Ober-Baurath ».

Travaux — Direction générale : M. Gulde, « Kgl. Bauinspector ».
— Conduite : M. Fleischhauer, « Kgl. Regierungsbaumeister »

3. — 1 Mark = 1^f^234.

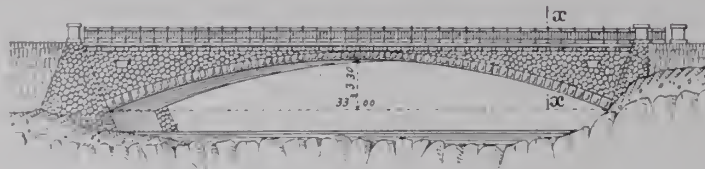
SOURCE :

S_1. — Zeitschrift für Bauwesen, 1888, p. 235 à 260, Pl. 38, 39, 40 : « *Steinbrücken mit « gelenkartigen Einlagen* » : — p. 254 à 258, Pl. 40 : « *Brücke über die Murr bei Marbach* ». Stuttgart, novembre 1887, Leibbrand, Kgl. Ober-Baurath.

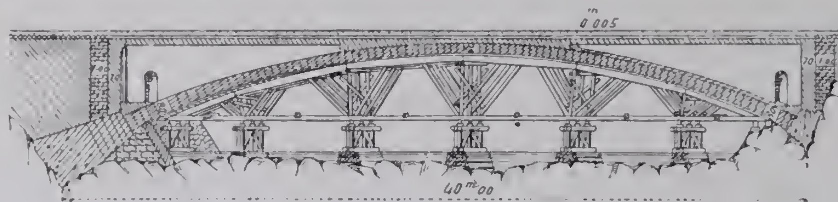
PONT SUR LA MURG, EN AVAL DE BAIERSBRONN[1] (WURTEMBERG)

1889 $\bar{A}^1$ r^te (≥ 40^m)3

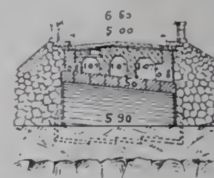
f₁ — Élévation — 2^mm



f₂ — Coupe en long et cintre — 2^mm5



f₃ — Coupe en travers sur xx de f₁ — 2^mm



1. — Station de la ligne de Freudenstadt à Klosterreichenbach, à 8k6 de Freudenstadt.

SOURCE :

S₁. — Fortschritte der Ingenieurwissenschaften, - Zweite Gruppe, 7 Heft ; « *Gewolbte* « *Brücken* », von Karl von Leibbrand, Präsident der K. Württ. Ministerial-Abteilung für den Strassen - und Wasserbau, Leipzig, 1897.

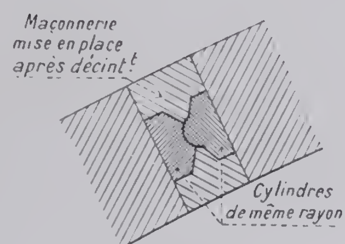
S'₁. — Tableaux statistiques, p. 50-51 et 52-53.

S''₁. — Dessins : Pl. I, fig. 6 à 10.

VOUTES SEMI-ARTICULÉES [1]

ARTICULATIONS

A GENOU [1]



Symbole : [1]

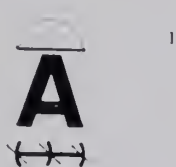


1. — Voir Tome IV, Livre I :
p. 28, — pour la définition des voûtes « semi-articulées »,
p. 26, — pour la définition des articulations « à genou »,
p. 28 et 29, — pour le sens du symbole.

VOÛTES SEMI-ARTICULÉES [1]

ARTICULATIONS A GENOU [1]

ARCS TRÈS SURBAISSÉS [1]



PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS ROUTE

Série A[1] r^{te} ($\geqslant$ 40^{m}) [1]

1. — Pour le classement des voûtes articulées et le sens des symboles, voir Tome IV, Livre I, p. 28 et 29.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

PONT - Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE: *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	ENSEMBLE: Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	GRANDE VOÛTE: INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Joints de rupture* Retombées	ROTULES *Pour les dimensions, rayons, pressions,... voir Tome IV, Livre III.*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg/0m01² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENT DES TYMPANS 2° *DÉCORATI... DES TÊTE...*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Munderkingen** *Wurtemberg* 1893 A[1] rte (= 40m) 1	*68m59* 30mm RD / RG 7m20	8m00 *7m 10* Pas de fruit 0m50	Arc d'anse de panier à 3 centres Sur le sol de fondation, Portée : **59m,00** Au-dessus du sol : **50m,00** *5m00* $\frac{1}{10} = 0{,}10$ *Rayons : à gauche de la clef : 65m* *à droite : Cerveau : 69m70* *Reins : 40m*	**1m,00** *1m,10* 1m10	Rotules d'acier prises dans des caissons en tôle,	B [1] Ciment lent.... 1v (Oberschwäbischen Cement-werke, Ehingen, Blaubeuren) Sable .... 2v5 Gravier 5v	Clef........ 35k3 Joint de rupt. : RG 37k9, RD 39k2 Retomb. : RG 35k5, RD 37k0 » 400k m²	1° 2 étages de voûtes longitudinal... de 0m90, sur murs de 0m60 2° *Bandeau... en mortie... de cimen... coloré, à 1v, 2...*

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, page II, n° 6.

SÉRIE $\underset{\leftrightarrow}{A}^1$ r[te] ($\geqslant$ 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0m01² *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE À MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Rive droite : *Rocher* » Pression normale : 15k » Rive gauche : *Gravier* » Pression verticale : max...... 3k moy..... 2k1 horizontale : sans frottement : 3k5 avec frottement de 0.7 1k2 *Pilotis et Épuisements*	Fixe Montants et contrefiches » Coins en chêne à 1/12	5 *24c* 1m85 *120mm*	» » 8761f	» » 22f6	A pleine épaisseur 4 attaques Tranches de 1m à 1m50	» *28 jours* 4 septembre	am[t] / aval t'_v : 30mm / 38mm t''_v (136 j.) : 72mm / 72mm (voir la monographie, p. 59) Mouvements des culées au décintrement Recul / Tassement RG : 2mm à 6mm5 / 3mm5 à 4mm RD : 3mm6 / 2mm	Fondations / Élévation / Ensemble D : 17276f / 70338f / 87614f D : S_p : 32f3 / 131f5 / 163f8 D : W : 4f0 / 16f4 / 20f5

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) = C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES SEMI-ARTICULÉES ARTICULATIONS A GENOU
ARCS TRÈS SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\overline{\mathbf{A}}^{1}$ r^te^ (≥ 40m)

MONOGRAPHIES

PONT SUR LE DANUBE, A MUNDERKINGEN[1] (WURTEMBERG)

1893 $\overline{\mathbf{A}}^{1}$ r^te^ (≥ 40m) 1

Φ_1 (S_2)

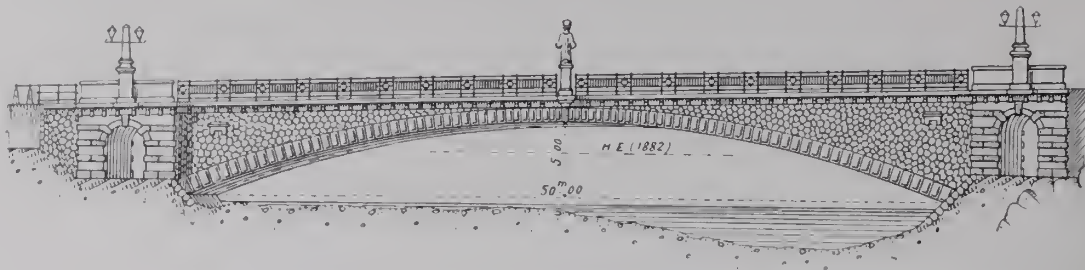


1. Pourquoi on a fait la voûte en béton. — Parce qu'on avait sur place du sable et du gravier excellents, — qu'on était près d'usines à ciment, — que l'arche est biaise (75°).

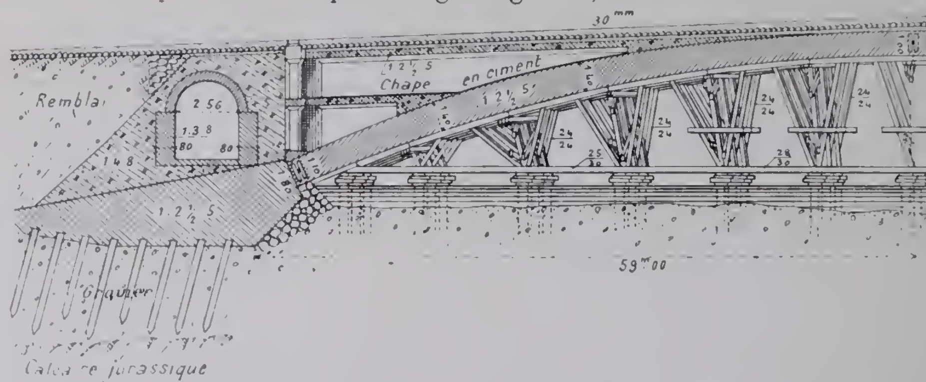
2. Courbes d'intrados et d'extrados. — Elles ont été définies par la condition que la fibre moyenne coïncidât avec la courbe de pression dans la voûte uniformément surchargée.

1. — Station de la ligne d'Ulm à Immendingen, à 44km9 d'Ulm.

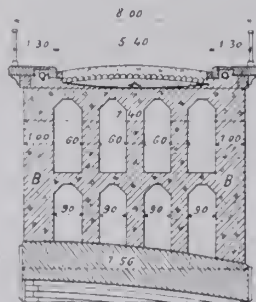
f₁ — Élévation amont — 2mm



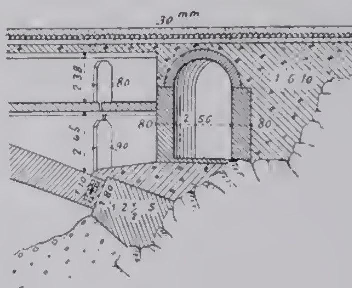
f₂ — Demi-coupe en long rive gauche, et cintre — 3mm



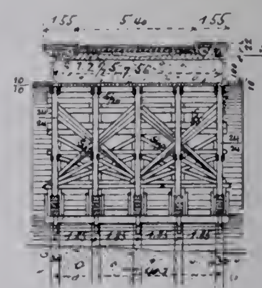
f₄ — Coupe en travers aux retombées — 4mm



f₃ — Culée rive droite — 3mm



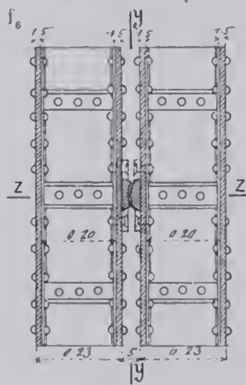
f₅ — Coupe en travers à la clef — 3mm



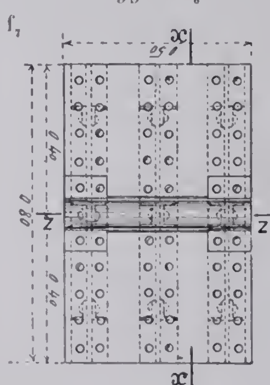
Rotule et Caisson

Coupes — 5cm

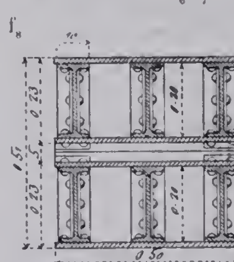
sur xx de f₇



sur yy de f₆

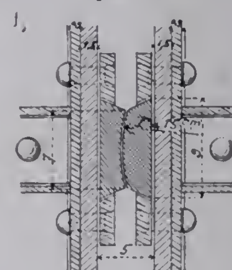


sur zz de f₆ f₇



Rotule

Coupe — 15cm



3. **Articulations** (f_6 à f_8). — Chaque charnière a 12 rotules de 0^m50 de longueur, disposées en échelons à cause du biais.

Une rotule comprend deux pièces d'acier de 70^{mm} de largeur, 25^{mm} d'épaisseur, à surfaces de contact polies suivant des surfaces cylindriques de 15^{cm} de rayon (f_9).

Elles sont encastrées dans des caissons en tôle (f_6 à f_8), appuyés sur des blocs de béton moulé de $110^{cm} \times 63^{cm}$.

Chaque rotule avec ses caissons coûte 142^f et pèse : tôle d'acier doux, 385^k; acier fondu, 16^k.

Φ₂ (S₂)



4. **Joints de dilatation dans les tympans.** — Au-dessus des articulations des naissances, on a ménagé des joints vides, masqués par les pilastres en saillie des petites arches de rive. Ils sont recouverts sous la chaussée et sous les trottoirs par deux fers ⌐ pouvant glisser l'un sur l'autre.

5. **Parements.** — Les têtes de la grande voûte sont crépies au mortier coloré en rouge. Les bandeaux des petites voûtes de rive, les consoles et les plinthes sont en béton moulé.

Tous ces parements jouent le grès rouge.

Les tympans sont en moellons calcaires, à joints incertains.

6. Chaussée et trottoirs. — Sur le béton (f_1), on a étalé une couche de ciment, puis 7^{mm} d'asphalte ; dessus, du sable, puis l'empierrement.

Un fer en ⋂, posé sur la chape, conduit l'eau à la culée rive gauche, la plus basse.

Les trottoirs, asphaltés, sont en encorbellement de 0^m30 sur consoles en béton moulé.

Le garde-corps est en fer (68^k à 0^f60 par mètre courant).

7. Matériaux.

A. *Composition du béton.*

			Composition en volume Ciment 1^v — Sable	Gravier	Poids de ciment pour 1^{mc} de béton en œuvre
Béton damé	Fondations	sans blocs noyés	2,5	5^v	238^k
		avec 1/4 de blocs noyés	4	8	191
	Voûte	sans blocs noyés	2,5	5	253
		mortier de tête coloré	2		244
	Autres parties		3	6	250
			4	8	200
			5	10	164
Béton moulé	non coloré		2,5	5	407
	coloré	ciment ordinaire	2,5	5	302
		supplément de ciment coloré			20

Dans les fondations seulement, le béton a été fait à la main.

On a employé dans l'ouvrage 552 tonnes de ciment.

B. Béton de la voûte. — Le ciment à prise lente pour la voûte était moulu très fin : pas de résidu sur le tamis à 900 mailles par $\overline{0^m01}^2$, 15 % sur le tamis à 5000 mailles.

A 7 jours, le mortier à 1 pour 3 de sable normal résistait en moyenne à 29^k à la traction.

D'après les essais, le meilleur dosage a été : 1 – 2,5 – 5.

Voici la résistance du béton ainsi dosé, sortant de la bétonnière :

Durée d'exposition à l'air	Arêtes des cubes essayés	Nombre d'expériences	Résistances à la compression, en Kg $\overline{0^m01}^2$ — minima	maxima	moyenne
7 jours	10^{cm}	10	146^k	270^k	209^k
28 jours	10	10	208	326	262
5 mois	20	4	333	358	343
2 ans 7 mois	20	4	526	537	532

Le sable et le gravier étaient soigneusement lavés.

8. Fondations. — La culée rive gauche est fondée sur 145 pieux battus avec une inclinaison de 15°.

Sur le fond nettoyé, on a coulé, sous 0^m50 d'eau, du béton à prise rapide ; puis, au-dessus de l'eau, le béton lent, tenu sec.

Chaque pieu porte : suivant son axe, 34^T8 ; transversalement, en tenant compte du frottement du béton sur le sol (0,7), 10^k3 par $\overline{0^m01}^2$ (1/12 de sa résistance transversale).

9. Exécution de la voûte. — On posa les rotules des naissances ; on chargea le cintre de 25 tonnes ; puis on pilonna le béton par couches de 30^{cm}, en tranches de 1^m à 1^{m}50, entre deux cloisons transversales ayant deux échelons à cause du biais.

Toutes les parois étaient recouvertes de gros papier huilé : en douelle et sur les têtes, étaient cloués des liteaux pour simuler des joints.

On bétonnait à partir des retombées, alternativement une tranche rive droite et une tranche rive gauche. On enlevait les cloisons 3 heures après le bétonnage.

Quand les faces bétonnées paraissaient sèches, on les enduisait de mortier de ciment pour les relier au béton suivant.

Lorsqu'on fut ainsi arrivé à 8^m des retombées, on établit sur le cintre, à 16^m des retombées, un appui permettant une nouvelle attaque qui a été poussée jusqu'à 2^m de la clef : on a ainsi construit en 4 tronçons.

Avant de couler le béton des têtes, on appliquait contre les cloisons de tête, une couche de 10^{cm} de mortier sec (ciment coloré 1^v, sable fin 2^v).

10. Mouvement des rotules des retombées. — Les abouts du cintre ayant tassé pendant la construction de 6^{mm}5 à 14^{mm}, les rotules d'acier furent déplacées.

On enleva le béton autour des caissons ; on boulonna entre eux les deux caissons d'une même rotule, et on les suspendit à la culée.

On boulonna de même entre elles les deux pièces des rotules de clef et on les maintint en place au moyen de coins en fer posés sur le cintre.

Après le clavage, on enleva les boulons pour permettre le jeu des rotules.

On avait mouillé le cintre pendant le bétonnage et on le laissa sécher après clavage. Pour le cas où une pluie l'aurait de nouveau gonflé, on l'abaissa, 10 jours après clavage, de 30^{mm}.

11. Tassements de la clef après le clavage.

Dates	Opérations	Température à 8h du matin	Abaissements totaux à la clef, en *mm* — observés — amont	observés — aval	ramenés à + 10° c[2] — amont	ramenés à + 10° c[2] — aval
1893						
7 août	Clavage	15°	»	»	»	»
17 —	Avant le 1er abaissement du cintre, de 30^{mm}	10°	23	7	23	7
22 —	Après — —	12°	43	40	45	42
4 septembre	Avant le 2e abaissement du cintre[3]	8°	45	34	43	32
	Après le décintrement complet	16°	75	72	82	79
19 —	»	12°	93	82	95	84
26 octobre	»	10°	127	122	127	122
1894						
18 janvier	»	−3°	147	144	133	130

2. — On a admis comme coefficient de dilatation du béton $8{,}8 \times 10^{-6}$. — Le mouvement vertical à la clef correspondant est de 1^{mm}1 pour 1° centigrade.

3. — Les coins (en chêne au 1/12e) descendirent très difficilement.

12. Comment on a condamné les articulations. — Le 26 octobre 1893, on condamna les articulations au mortier (ciment 1^v, sable 2^v).

13. Dépenses (non compris les abords).

Fondations	17.276^f
Cintre	8.761^f 40
Pont proprement dit	49.853^f 60
Surveillance et divers	11.723^f
Total	87.614^f

14. Quelques prix d'unité. — Le mètre cube de béton a coûté :

comme fabrication	2^f 17
en œuvre	5^f 55

Le salaire d'un ouvrier était de 3^f 21.

15. Personnel.

Projet et Direction générale des Travaux : M. le Président Leibbrand.
Conduite des Travaux : M. Euting « Oberbaurath » à Stuttgart ;
M. Braun « Strassenbauinspector » à Ehingen.
Entrepreneur : M. Max Buck, d'Ehingen.

SOURCES :

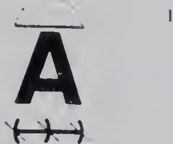
S_1. — Zeitschrift für Bauwesen, 1894, p. 541 à 558, Pl. 64 et 65 : « *Betonbrücke über die « Donau bei Munderkingen* », — Président Leibbrand, — Stuttgart, février 1894.

S_2. — Ce que j'ai vu — août 1908.

VOÛTES SEMI-ARTICULÉES [1]

ARTICULATIONS A GENOU [1]

ARCS TRÈS SURBAISSÉS [1]



(Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

Série A [1] F[r] (⩾ 40m) [1]

1. — Pour le classement des voûtes articulées et le sens des symboles, voir Tome IV, Livre I, p. 28 et 29.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER

PONT - Date Symbole	PROJET ENSEMBLE		GRANDE VOÛTE					
	Longueur *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans* *sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Retombées*	ROTULES *Pour les dimensions, rayons, pressions,... voir Tome IV, Livre III.*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1 mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg $\overline{0^m01}^2$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENT DES TYMPANS 2° *DÉCORATIO[N] DES TÊTE[S]*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Morbegno** *Italie* 1902-1903 A[1] Fr (~ 40m)[1]	*117m 15* 0 12m56 étiage	4m 50 *5m 00* Fruit : 1/20 1/06 jusqu'au-dessus du rail	Arc d'anse de panier à 3 centres **70m,00** *10m 00* $\frac{1}{7}$ = 0,143 *Rayons :* *Cerveau : 71m* *sur 27° 31' 30''* *Reins : 50m696* *sur 21° 53' 22''*	1m,50 *2m,20*	Rotules d'acier prises dans des caissons en tôle,	PT[1] Granit (1100k) *Ciment — 600k*	Pression maxima : sans surcharge / avec surcharge Clef : 38k4 (intr.) / 47k3 (extr.) Reins : 43k8 (extr.) / 55k4 (extr.) Retomb. : 29k5 (extr.) / 46k9 (extr.) avec refroidissement de 34° Clef : 69k4 (extr.) Reins : 70k1 (intr.) *Arc élastique* *Méthode Ritter* 5750k/1mc'	1° 8 voûtes transversa[les] vues, en plein cin[tre] de 4m50, en béton sur piles de 1m10. On a artic[ulé] à la clef et aux re[tombées] celles au-dess[us] des articulati[ons] de retomb[ées] de la grande voû[te] 2° *Archivolt[es]*

(1) — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. 11, n° 6.

A VOIE NORMALE **SÉRIE $\overset{\frown}{\underset{\leftrightarrow}{A}}^{1}$ Fr (> 40m)** **TABLEAU SYNOPTIQUE**

FONDATIONS	EXECUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES		Cube de bois / Poids de fer / Dépenses		MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT	TASSEMENTS DE LA CLEF	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q — DÉPENSE D
Nature du sol / Profondeur sous l'étiage / Pressions sur le sol en kg 0m01² / *Procédé*	Type / *Matière* / Appareils de décintrement	Nombre / *Épaisseur* / Écartement d'axe en axe / *Surhaussement*	Totaux	par mq de douelle [2]		État d'avancement du pont / *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* / Date	sur cintre t_c / au décintrement t'_v / après t''_v	Totaux et par unité de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
…ive droite : *Rocher* » » » …ive gauche : *Alluvion solide* » » *Béton :* *…rtland* 100k *…ble* 1m³ *…avier* 1m³7	Fixe Montants et contrefiches » Coins à 3 pièces	5 2.5cm 1m40 *120mm*			3 rouleaux A chaque rouleau, 10 tronçons limités au droit des montants du cintre. Joints secs au droit des autres points fixes.	» *28 jours* 4 mai	t'_v = 126mm	D = 364 000f D : S_p = 690f5 D : W = 74f6

…ur le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES SEMI-ARTICULÉES   ARTICULATIONS A GENOU

ARCS TRÈS SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\overline{A}^{1}$ F^{r} (> 40m)

MONOGRAPHIES

PONT SUR L'ADDA, PRÈS DE MORBEGNO *(ITALIE - Valteline)*

Ligne de Colico à Sondrio [1]

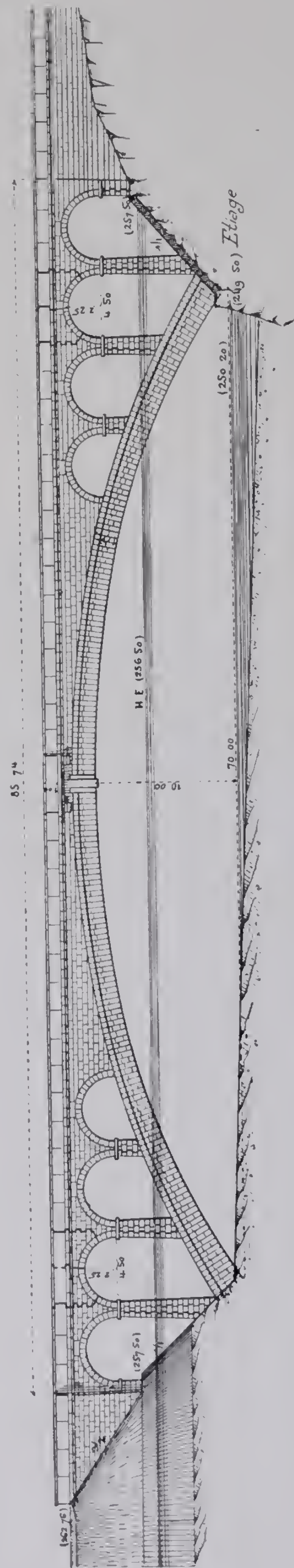
1902-1903 $\overline{A}^{1}$ F^{r} (> 40m) [1]

Φ_1 (S_6)

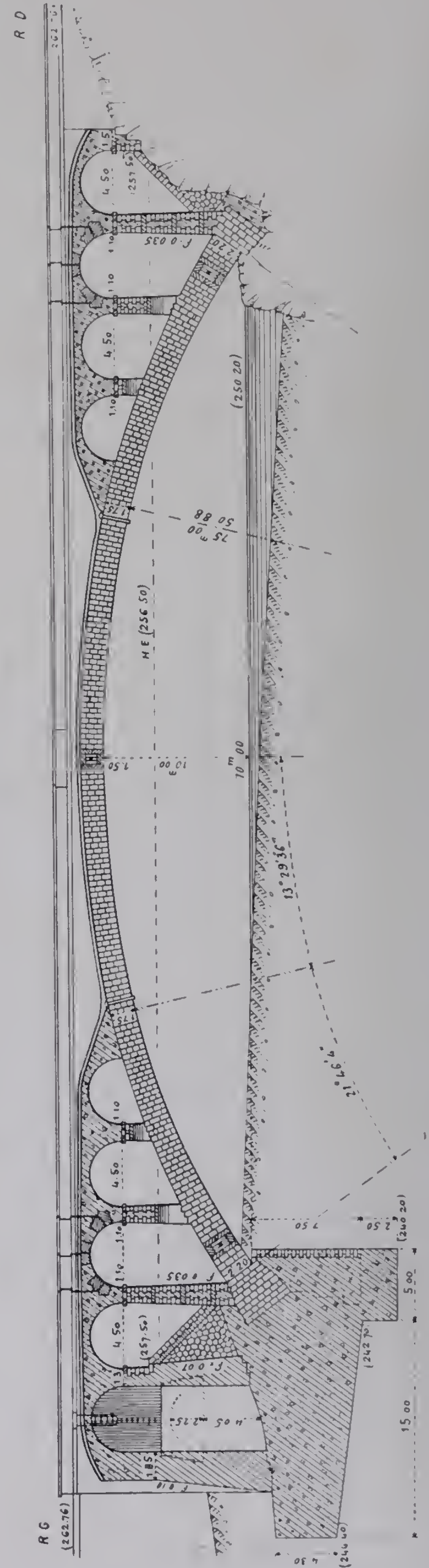


1. Pourquoi on a fait une grande voûte. — Parce que les crues de l'Adda, subites et violentes (S_3), auraient bousculé des fondations en rivière.

1. — Ligne électrique à 1 voie normale. — Le pont est au P^t 19k979 (S''_4).



f₁ — Élévation, amont — 2mm



f₂ — Coupe en long — 2mm

2. Aspect. — Le pont a même aspect général, même archivolte, que le pont Antoinette [2].

Φ_2 (S_6)



3. Intrados (S'_1).

		Projet	Exécution Clef surélevée de 120mm
Cerveau	Rayon de l'arc de cercle	75^m	74^m
	Amplitude	26°59'12"	27°31'30"
Reins	Rayon de l'arc de cercle	50^m88	50^m696
	Amplitude de chaque côté	21°46'4" (S'_1)	21°53'22"

4. Extrados. — Il est défini par la condition que la fibre moyenne soit la courbe de pression sous le poids propre (S_3).

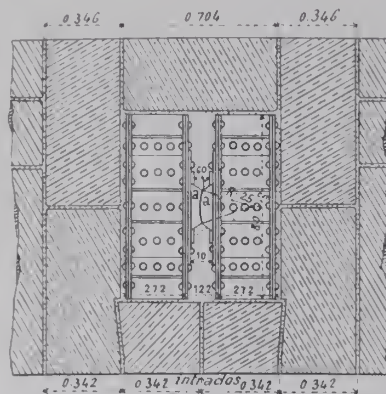
L'épaisseur e de la voûte varie de 1^m50 à la clef à 2^m20 aux retombées, suivant la formule :

$$e = 1^m50 + 0{,}000841\ x^2 \qquad (S'_1)$$

5. Articulations. — Ce sont des blocs d'acier *a a* (f_3, f_4), à surface de contact cylindrique, pris dans des caissons en tôle.

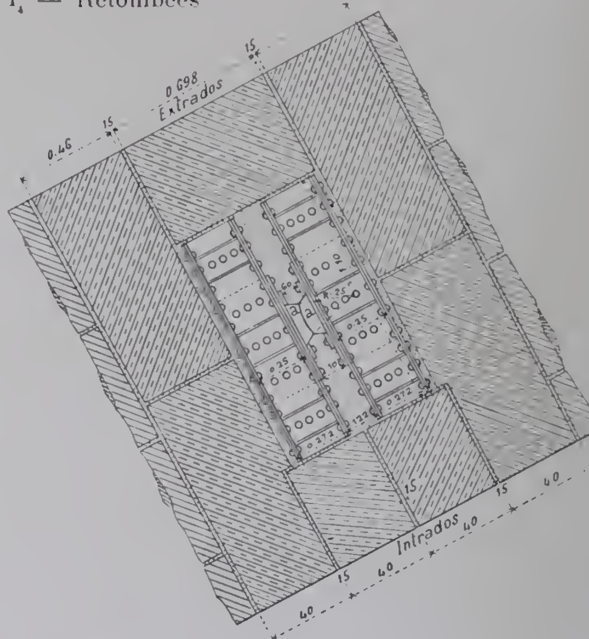
Articulations — Coupes — 3cm

f_3 — Clef



Les pierres de taille condamnant les articulations, n'ont été mises en place qu'après décintrement et achèvement des maçonneries.

f_4 — Retombées



Avant qu'on ait condamné les articulations (S_7)

Φ_3 — Clef



Φ_4 — Retombées



6. Dispositif permettant aux tympans de suivre les mouvements de la grande voûte (S'_4) (Φ_3 ; f_5, f_6). — Les voûtes d'évidement sont en béton (mortier de ciment à 600k, - 1mc7 de gravier) (S_3).

Celles au-dessus des articulations des retombées (les troisièmes à partir de la clef) sont elles-mêmes articulées à la clef et aux reins.

Les voussoirs de granit AA', BB', CC' (f_6), sont taillés en j, suivant deux surfaces cylindriques de 1m555 et 1m580 de rayon, roulant l'une sur l'autre.

Φ_5 — Voûtes d'évidement articulées au-dessus des retombées de la grande voûte (S_6)

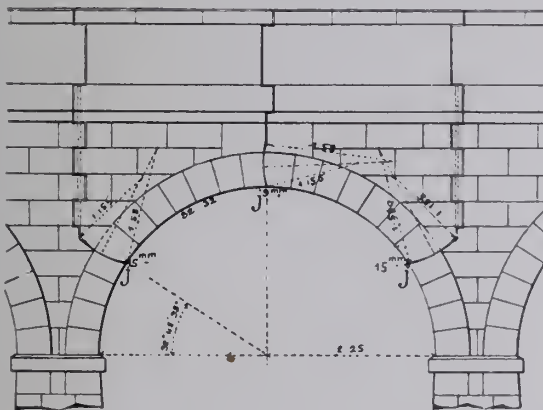


A j correspondent, dans les tympans et le couronnement, des joints de 20mm laissés vides.

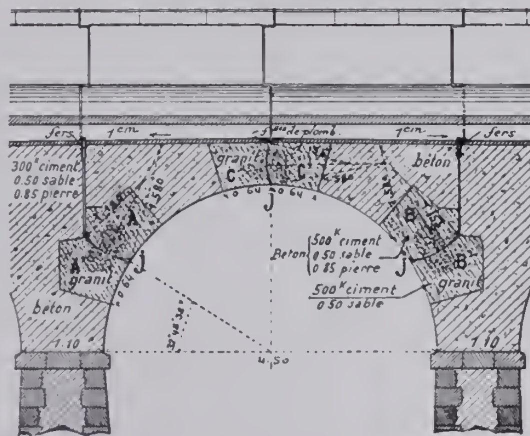
Ils sont fort apparents (Φ_5).

Articulations des voûtes d'évidement au-dessus des retombées de la grande voûte
Joints vides dans les tympans — 10cm

f_5 — Élévation



f_6 — Coupe en long



7. Calcul des efforts (f_7). — Comme les articulations n'ont été condamnées que le pont terminé, et avant le passage des trains, la voûte est articulée pour le poids mort, inarticulée (ou « encastrée ») pour les charges roulantes et les changements de température.

Pour chaque joint, on a placé la surcharge dans la position la plus défavorable.

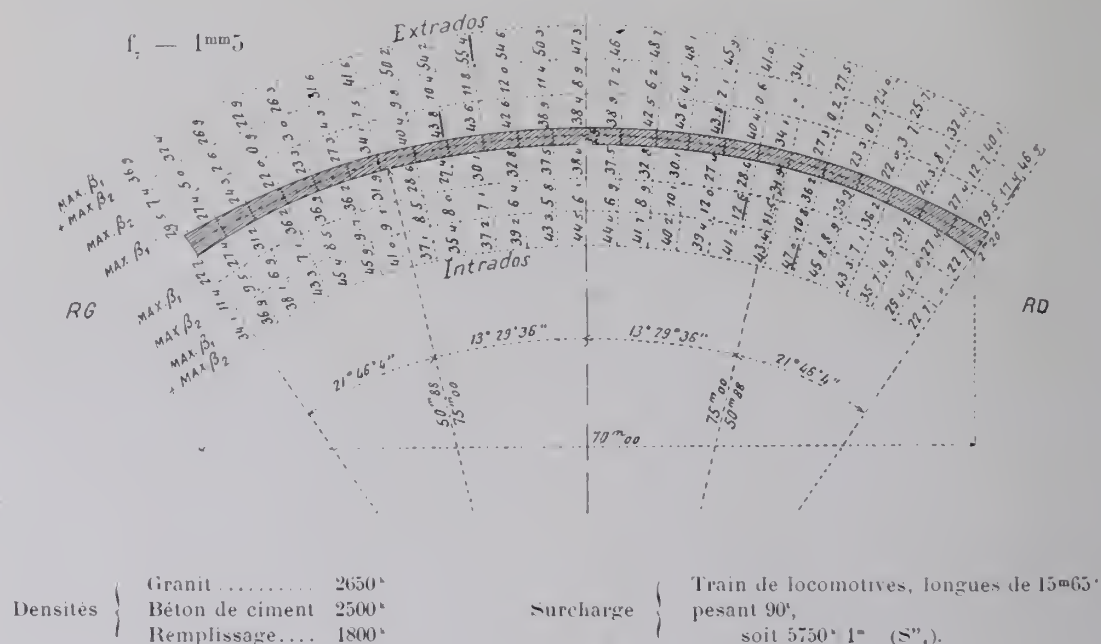
Le graphique f_7 résume les épures et les calculs.

Pressions maxima à l'intrados et à l'extrados, en kg $\overline{0^m01}^2$.

MAX β_1 *sous la charge permanente,*

MAX β_2 *sous la surcharge roulante, dans la position la plus défavorable,*

MAX β_1 + MAX β_2 *sous la charge permanente et la surcharge roulante.*



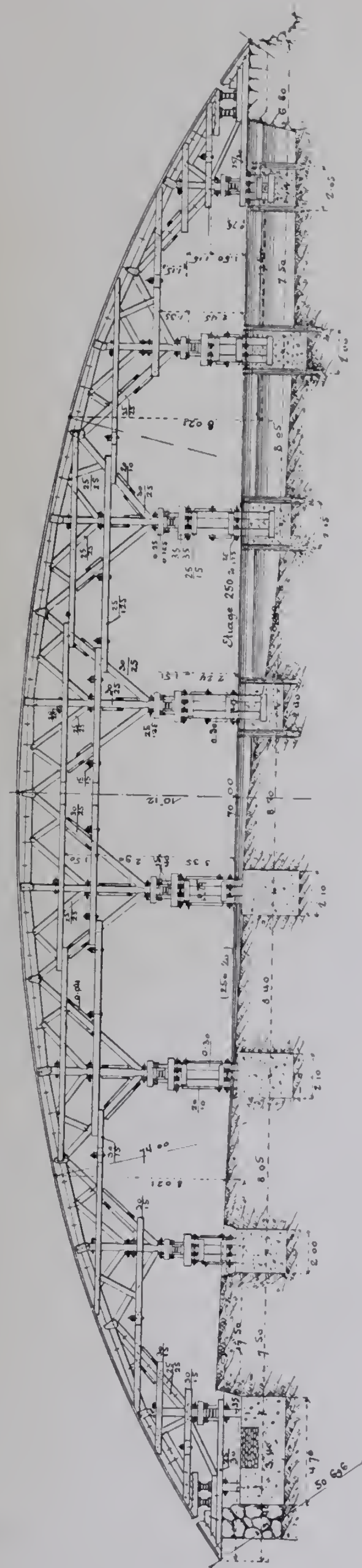
8. Cintre (S'_1, S''_1) (f_8 à f_{12}). — Dans les pièces qui ne sont pas exposées à flamber, l'effort maximum est de 80^k $\overline{0^m01}^2$.

La pression sur le sommet des palées est de 52^k.

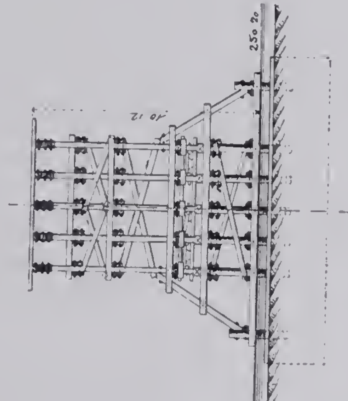
Les coins de décintrement, à 3 pièces [3], étaient maintenus pendant l'exécution par la pièce p et l'arrêt B (f_{12}).

3. — Même dispositif qu'au Pont de Gloucester (1826-1827) E¹ 1ʳᵉ (≥ 40ᵐ)¹, Tome 1.

Cintre

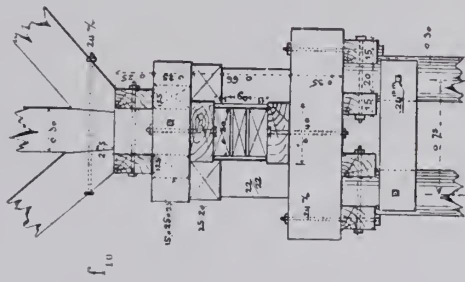


f_8 — Élévation — 2mm5

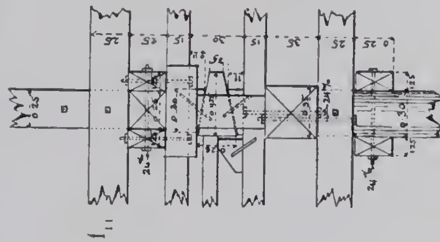


f_9 — Coupe en travers — 2mm5

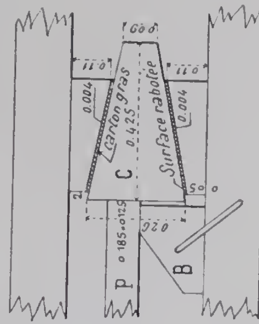
Appuis — 2m



f_{10} Vue en long



f_{11} Vue en travers



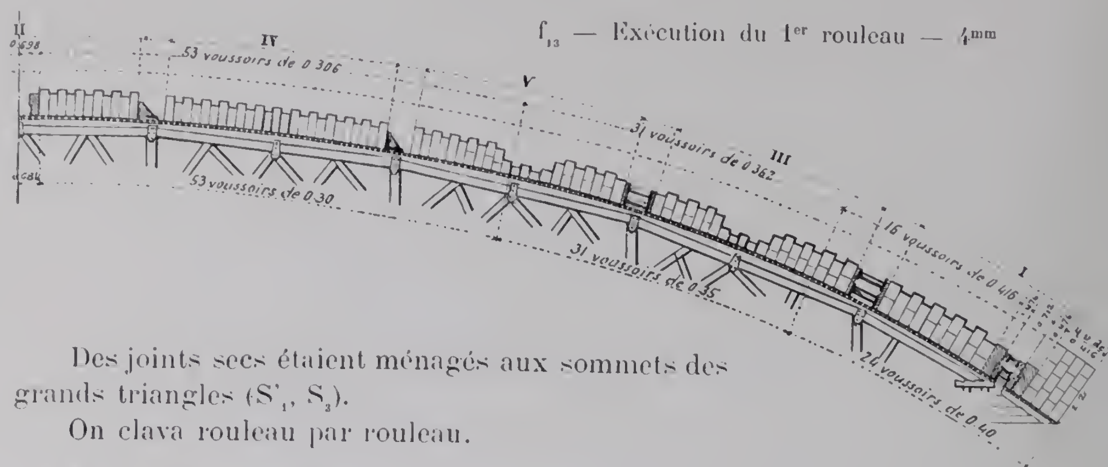
f_{12} — Coins de décintrement — 5cm

9. Exécution de la voûte. — On l'a construite :

à pleine épaisseur, jusqu'aux articulations des retombées ;

au-dessus, en trois rouleaux de 10 tronçons chacun, limités, au droit des montants du cintre, par des coffrages vers les retombées, par des taquets au cerveau (f_{13}).

f_{13} — Exécution du 1er rouleau — 4mm



Des joints secs étaient ménagés aux sommets des grands triangles (S'_1, S_2).

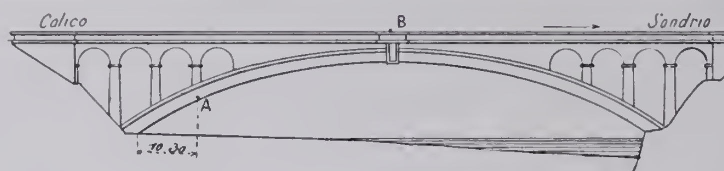
On clava rouleau par rouleau.

10. Décintrement et achèvement. — On décintra le 4 mai 1903 (S_2, S_6).

En août, on acheva les maçonneries au-dessus de l'extrados, et on condamna les articulations (S_5).

11. Epreuves (10 mars 1904) (S''_1). — On installa :

f_{14} — Position des appareils de mesure — 1mm



aux reins (A) (f_{14}), des verniers disposés verticalement et horizontalement ;

à la clef (B) deux fleximètres Trau (1 dans chaque niche).

Puis on fit passer un train de 5 locomotives dans le sens →.

Voici, en *mm*, les mouvements observés :	Déplacements horizontaux	Déplacements verticaux
1° *Aux reins (A)* (f_{14})		
1/2 voûte Colico chargée	→ 0,3	↓ 1,3
Tout le pont chargé	0	↑ 0,7
1/2 voûte Sondrio chargée	← 0,1	↑ 0,9
Train passant en vitesse		passager ↓ 1mm6 permanent ↓ 0mm3
2° *A la clef (B)* (f_{14})		
Train passant en vitesse		passager ↓ 2mm (MAX)

Ces mouvements sont de l'ordre de ceux qu'on observe au décintrement.

12. Effet des changements de température.

A. - Mouvements de la voûte (f_{15} à f_{18}). — La voûte est dans l'air sur toute sa douelle et les 4/10 environ de son extrados.

De mars 1904 à mars 1905, on releva chaque jour la température de la voûte et celle de l'air (S_4).

Les diagrammes (f_{15} à f_{18})[4] établissent ceci (S_4) :

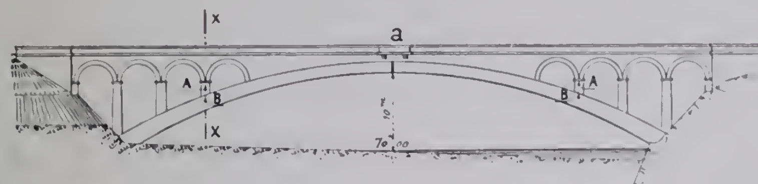
1° – Le corps de la voûte est à la température moyenne des 24h.

2° – Dans l'année, la variation totale fut de 34° (+26° le 15 août, — 8° au commencement de janvier).

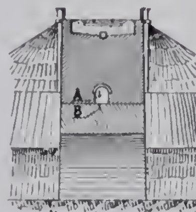
3° – Les mouvements de la clef suivent exactement les variations de la température de la voûte.

Emplacement des thermomètres

f_{15} — Élévation— 1mm

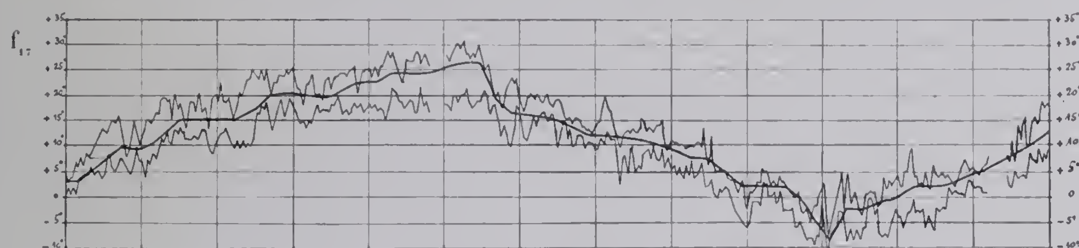


f_{16} – Coupe sur xx de f_{15}



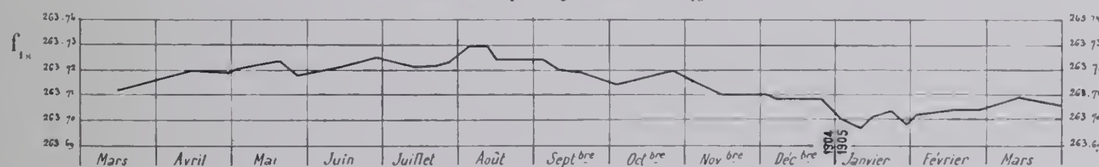
Températures { —— maxima et minima de la journée (thermomètre A) / —— de la maçonnerie (thermomètre B à 0m60 de l'extrados de la voûte).

f_{17}



Cote du parapet en a (f_{15})

f_{18}



La variation totale, de la première quinzaine d'août à la première quinzaine de janvier, a été de 33mm (S_4).

M. le Professeur Guidi a calculé ce déplacement par les formules des arcs élastiques, avec le coefficient de dilatation déterminé par Bouniceau pour le granit, 8×10^{-6}.

4. — Gracieusement communiqués par M. le Commandeur Cajo, en janvier 1910.

Il a trouvé : Δb (en *mm*) = 1,1 τ

Soit, pour $\tau = 34°$: $\Delta b = 37^{mm}$. On a mesuré 33^{mm}.

Les résultats concordent.

Sous les variations de température, la voûte se comporte réellement comme un solide élastique.

On vient de voir qu'aux épreuves, la clef n'avait baissé que de 2^{mm} : c'est ce qu'aurait produit un refroidissement de 2°.

En janvier 1906, M. l'Ingénieur Figari constata près de chaque culée, au-dessus de la clef d'une voûte d'évidement, deux fissures de 3^{mm} [5] environ traversant des moellons de granit et montant jusqu'au parapet (S_5).

B. - Variation du travail par $\overline{0^m01^2}$. — M. le Professeur Guidi (S_4) a calculé, en supposant l'arc élastique, les efforts dans la voûte pour un refroidissement de 34° :

	Naissances		Clef	
	Intrados	Extrados	Intrados	Extrados
Il a trouvé	+ 36k compression	— 39k tension	— 28k tension	+ 22k compression
Sous l'action des surcharges, les efforts sont (S''₁) :				
Maximum	+ 11k4			+ 8k9
Minimum		— 8k6	— 2k1	
Ensemble (efforts limites sous la surcharge la plus défavorable, avec refroidissement de 34°).	+ 47k4	— 47k6	— 30k1	+ 31k
L'effort sous la charge permanente est (S''₁).	+ 22k7	+ 29k5	+ 38k4	+ 38k4
Effort résultant	+ 70k1	— 18k1	+ 8k3	+ 69k4

Si la voûte avait été clavée avec un écart de 34° par rapport au jour le plus froid, elle se serait, ce jour-là, ouverte aux reins de l'extrados.

13. Personnel [6].

Ingénieurs. — *Projet :* M. Giovanni Marro, aidé de M. Fausto Lolli.

(Bureaux de M. l'Ingénieur Rinaldo Rinaldi, Sous-Directeur général des Chemins de fer de l'Etat. — Direction des Travaux d'Ancône).

Direction des Travaux : M. Edouard Garneri, alors Chef de la section d'Entretien de Milan ; — M. Giovanni Baseri.

Entrepreneur : M. Carlo Bregani.

5. — Soit, pour les 4 fissures, environ 12^{mm}.

6. — Renseignements gracieusement communiqués, sur l'invitation de M. le Commandeur Cajo, par M. Ed. Garneri.

SOURCES :

S_1. — Società Italiana per le Strade Ferrate Meridionali, — Linea Colico-Sondrio « *Ponte in Muratura della luce di metri 70, sul fiume Adda presso Morbegno, al Km. 19 + 979* ».

S'_1 — Atlas de 11 planches.

S''_1. — Relazione dei Calcoli di Resistenza (Janvier 1904).

gracieusement adressés par M. le Commandeur Cajo, alors Directeur des Travaux à Ancône.

S_2. — Il Politecnico, mai 1903, p. 277 et suivantes, Pl. 22.

S_3. — Schweizerische Bauzeitung, 5 septembre 1903, p. 116 à 120 : « *Die neue steinerne « Addabrücke bei Morbegno der Eisenbahnlinie Colico-Sondrio* », A. Acatos, Ingenieur.

Le Génie Civil a donné une note extraite de S_3 (n° du 24 octobre 1903, p. 409 et 410) : « *Pont en maçonnerie sur l'Adda à Morbegno (Italie)* ».

S_4. — « *Influenza della temperatura sulle costruzioni murarie* » (Note de M. le Professeur Guidi, — Académie des Sciences de Turin, — Turin 1906).

S_5. — Il Politecnico, juin 1907 : « *Influenza della temperatura nelle costruzioni in « muratura, cemento e cemento armato* », p. 339 et suivantes. (Communication de M. l'Ingénieur L. Figari).

S_6. — Ce que j'ai vu — septembre 1904.

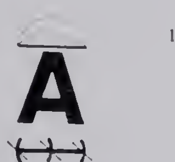
Sur l'invitation de M. le Commandeur Cajo, M. l'Ingénieur Fausto Lolli, de la Direction des Travaux d'Ancône, a bien voulu m'accompagner à Morbegno.

S_7. — Photographies que m'a très aimablement remises M. Fausto Lolli - septembre 1904.

VOÛTES SEMI-ARTICULÉES [1]

ARTICULATIONS A GENOU [1]

ARCS TRÈS SURBAISSÉS [1]



(*Suite*)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES

SOUS ROUTE

Série $A^{n} r^{te}$ $(\geqslant 40^{m})$ [1]

1. — Pour le classement des voûtes articulées et le sens des symboles, voir Tome IV, Livre I, p. 8 et 9.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

<table>
<tr><th rowspan="3">PONT
-
Date
Symbole
En quoi consiste l'ouvrage
1</th><th colspan="8">PROJET</th></tr>
<tr><th colspan="2">ENSEMBLE</th><th colspan="5">GRANDES VOÛTES</th><th rowspan="2">1°
ÉVIDEMENT DES TYMPANS
2°
DÉCORATIO[N] DES TÊTES
9</th></tr>
<tr><th>*Longueur* *entre abouts des parapets*
Déclivités
Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage
2</th><th>Largeurs entre parapets
entre tympans sous la plinthe
Fruit des tympans
Revanche de la chaussée sur l'extrados
3</th><th>INTRADOS
Portée
Montée
Surbaissement
Rayons
4</th><th>ÉPAISSEURS
CORPS ET TÊTES
Clef
Joints de rupture
Retombées
5</th><th>ROTULES
Pour les dimensions, rayons, pressions,... voir Tome IV, Livre III.
6</th><th>MATÉRIAUX
Mortier
Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment
7</th><th>PRESSIONS
en kg $\overline{0^m01}^2$
Hypothèse adoptée
Surcharges supposées
8</th></tr>
<tr><td>de la
Coulouvrenière
à
Genève
Suisse
1895-1896
A[n] P[te] (≥ 40m)[1]
2 voûtes égales de 40m
Entre elles, une arche de 10m 80
Sur la rive droite, une arche de 12m</td><td>*150m*
En profil en long, la chaussée est en courbe de 50cm de flèche
6m46 (RG) étiage</td><td>18m00
18m 70
Pas de fruit
0m75</td><td>40m00
5m 40
$\frac{1}{7,407} = 0,135$</td><td>1m00
1m 40
1m20</td><td>Rotules d'acier prises dans des caissons en tôle.</td><td>B[1]
fait à la machine
Pour 1mc de béton,
Ciment de Reuchenette et du Pasquier (fin) 425k
Sable de l'Arve.. 0m3 5
Gravier de l'Arve 0m3 8
Résistance à 28 j.
289k à 302k</td><td>Pression maxima :
Clef : 30k
»
1000k/m²</td><td>1°
3 étages de 9 voût[…] longitudin[…] en béton, de 1m49 sur murs de 0m45.
Tira[…] entre tym[…]
2°
Écuss[…] dan[s] les tymp[…]</td></tr>
</table>

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, page 11, n° 6.

SÉRIE $\underset{\leftrightarrow}{A}^{n}$ 1re ($\geqslant 40^m$)

TABLEAU SYNOPTIQUE

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0^m01^2 *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDES VOÛTES — CINTRES — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Culée rive gauche : *Glaise et roche glaciaire* » Pression maxima : 3^k2 *Pieux verticaux et obliques* [6] Massif central : » – 3^m70 sous le lit – 7 à 8^m sous l'eau Pression maxima 2^k2 *Épuisements* Culée rive droite : » » Pression maxima : 3^k9 »	Fixe » Boites à sable Plâtre entre le piston et la boite Coins sous les hautes eaux	13 » 1^m50 *200^{mm}*	402^{mc} pour les 2 arches, non compris couchis et semelles		A pleine épaisseur, entre cloisons distantes de 1^m	*Voûte rive droite* Maçonnerie au-dessus des voûtes, en cours *79 jours* 9 décembre	*Voûte rive droite* $t_c = 26^{mm}$ t'_v { am^t 25^{mm} / aval 24^{mm} t''_v $21^{mm}5$ (100 j.) Pile RG / Culée RD au décintrement : | →2^{mm} après : 5^{mm} ↓ | →6^{mm}	$Q = 19244^{mc}$ $Q : S_p = 6^{mc}9$ $Q : W = 0^{mc}7$
						Voûte rive gauche Maçonnerie au-dessus des voûtes, en cours *71 jours* 28 janvier	*Voûte rive gauche* $t_c = 19^{mm}$ t'_v { am^t $30^{mm}5$ / aval 32^{mm} t''_v $11^{mm}7$ (51 j.) Culée RG / Pile RD au décintrement : ←5^{mm} | 2^{mm} ↓ après : ←$1^{mm}5$ | 0	

Pieux (col. 12–14)

	verticaux	*inclinés à 30°*
Diamètre	*28^c à 45^c*	*32^c à 44^c*
Nombre	*177*	*227*
Fiche moyenne	*9^m70*	*10^m91*
Poids du mouton	*800^k*	*2000^k*
Hauteur de chute	»	*2 à 4^m*

[2] Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES SEMI-ARTICULÉES ARTICULATIONS A GENOU
ARCS TRÈS SURBAISSÉS

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE $\overline{A}^{n}$ r^{te} ($\geqslant$ 40^m)

MONOGRAPHIES

PONT DE LA COULOUVRENIÈRE, SUR LE RHÔNE, A GENÈVE[1]

1895-1896 $\overline{A}^{n}$ r^{te} ($\geqslant$ 40^m) I

Ph. (S$_3$)



1. Articulations (f_5, f_6). — Les deux grands arcs en béton ont été, pendant la construction, articulés à la clef et aux retombées par des rotules[2] d'acier prises dans des caissons en tôle ; après décintrement, on a fermé au mortier les joints d'articulation : celui de la clef, avant les épreuves ; les autres, après.

La voûte du milieu (10^{m}80) et celle de rive droite (12^m) ont été simplement articulées par des bandes de plomb (S$_2$).

1. — Entre les Boulevards de Plainpalais (rive gauche) et de James Fazy (rive droite).

2. — « *copiées* » sur celles du pont de Munderkingen (1893). $\overline{A}^{1}$ r^{te} ($\geqslant$ 40^m) I — Tome IV (S$_1$).

f₁ — Ensemble, amont — 1^mm

f₂ — Grande voûte, rive droite — 2^mm

f₃ — Demi-coupe en long et cintre de la grande voûte rive gauche — 3^mm

f₅ - Rotule et caisson - 5^cm

f₄ — Demi-coupe en travers aux retombées — 5^mm

f₆ — Rotule — 20^cm

2. Voûtes d'évidement (f_3, f_4). — La poussée des voûtes d'évidement sur les tympans est arrêtée par des tirants en fer *a* (f_4) de 17m50 de longueur et 35mm de hauteur, disposés tous les mètres et articulés en 3 points (S_2).

3. Matériaux.

A. - Béton. — A_1. - *Grandes voûtes.* — Voici les résultats des essais à 28 jours du béton des grandes voûtes (425k de ciment par m c. en œuvre).

		Arche rive gauche	Arche rive droite
Résistance	minima	230k	250k
	maxima	380	420
	moyenne	289	302

A 28 jours, la résistance est plus grande dans le sens du pilonnage que dans l'autre.

A 84 jours, elle est la même.

A_2. - *Culées.* — Là où la pression dépasse 6k, le béton est à ciment (200k à 300k par mc.) ; ailleurs, à chaux hydraulique de Lafarge ou de Noiraigue (200k).

B. - Parements des têtes. — Les bossages des bandeaux sont faits d'éclats de pierre noyés dans le béton (S_2).

Les piles sont parementées en pierre jaune de Saint-Ismier (S_2) ; les socles, jusqu'à 0m30 sous les naissances, sont en granit (blocs erratiques de la région du Salève) ; les tympans, en pierre blanche de Divonne (S_2).

La corniche est en marbre bleu-noir de Saint-Triphon ; les balustres et les colonnes, en granit rose de Baveno.

On a mis les moins bons matériaux là où il y a le plus de travail.

4. Fondation de la culée rive gauche. — On y a rencontré de la glaise, puis de la boue lacustre, puis de la boue glaciaire.

On dressa le terrain, horizontalement à l'amont, à 30° environ à l'arrière, et on y battit des pieux.

5. Voûtes. — On les bétonna par tranches de 1m d'épaisseur environ entre deux cloisons transversales, dans l'ordre des chiffres de f_5.

f_5 - Division des voûtes en tranches - 3mm



6. Décintrement.

A. - Grande arche rive droite[3]. — On abaissa d'abord les 6 fermes de rang pair ; puis les impaires dans cet ordre : 1, 5, 9, 13, 3, 7, 11.

Voici les observations faites au décintrement, et après :

Dates		Abaissement des pistons en mm	Mouvements en mm — Pile culée rive gauche ↓	Arche rive droite — Naissance rive gauche — amont ↓	Arche rive droite — Naissance rive gauche — aval ↓	Arche rive droite — Clef — amont ↓	Arche rive droite — Clef — aval ↓	Arche rive droite — Naissance rive droite — amont ↓	Arche rive droite — Naissance rive droite — aval ↓	Pile-culée rive droite ↓	Pile-culée rive droite →	Observations
Décintrement (Décembre 1895)	9 — 5h15 s	*10*	0	10	9	12	10	12	9	0	0	
	10 — 10h30 m	*20*		16	14	20	20	18	14	0	0	
	1h s	*30*		16.6	16	22	23	20	15.6			
		40		18	17	23	23	20	16			On déboulonne les abouts du cintre.
	11 matin			20	18	25	26	21	18			Pas de fissures. Joints de dilatation ouverts. On reprend à 1h du soir les descentes des pistons par 20mm jusqu'à 100mm.
	11 après-midi	*100*		20	18	25	24	22	17	0	→ 2	
Après décintrement (1896)	Janvier 30		2			40				0	→ 6	
	Février 14		5			43				1	→ 6	
	Février 29					43.5						

B. - Grande arche rive gauche. — Voici les observations faites au décintrement, et après :

Dates		Abaissement des pistons en mm	Mouvements en mm — Culée rive gauche ←	Culée rive gauche — amont ↓	Culée rive gauche — aval ↓	Arche rive gauche — à 10m de la clef, côté rive gauche — amont ↓	Arche rive gauche — à 10m de la clef, côté rive gauche — aval ↓	Arche rive gauche — Clef — amont ↓	Arche rive gauche — Clef — aval ↓	Arche rive gauche — à 10m de la clef, côté rive droite — amont ↓	Arche rive gauche — à 10m de la clef, côté rive droite — aval ↓	Pile culée rive droite — aval ↓	Observations
Décintrement (Janvier 1896)	28	*10*				8	6	17	13	9	6		
	28 soir	*20*				12	11	19	18	12	9		
	29 7h30 m	*30*				14	13	24	21.6	12.6	11.8		
	29	*50*											Plus de tassement. On démonte les abouts du cintre.
	29 4h s		← 5	2	3	16	16	28	27	16.6	19.6		
	30 — 8h m		← 5	3	4	16	17	30.5	32	14	18	2	
Après décintrement (1896)	Février 14		← 6.5	3				37					
	Février 29							41.5					
	Mars 14							42.5					
	Mars 21							43					

3. — La voûte de 12m (rive droite) avait été décintrée le 17 septembre 1895 ; celle de 10m80 du milieu, le 30 septembre.

7. Épreuves (1896).

A - 23-24 mars. — On chargea la voûte rive gauche, à partir de sa retombée rive droite, de 0m50 de gravier sur les trottoirs [1], et de 0m28 sur la chaussée (500k par m. q.).

B. - 11 avril. — Deux locomotives à voie normale, pesant 75 et 76 tonnes, couvrant ensemble 42m, ont passé au pas, avec un arrêt de 3 minutes.

On n'a pas constaté de mouvement sous les surcharges.

8. Dates.

			1895
Commencement des travaux			mars
Fondations	Battage des pieux	verticaux	2 août - 1er septembre
		obliques	16 octobre - 14 décembre
	Commencement du bétonnage	Culée rive droite	1er avril
		Massif central	26 avril
		Culée rive gauche	10 septembre

	Voûtes		
	Rive gauche	Centrale	Rive droite
	1895	1895	1895
Commencement du montage des cintres	4 novembre	22 juin	17 juillet
Bétonnage des voûtes	4-16 nov.	9-16 août	2-21 septembre
Commencement des travaux au-dessus des voûtes	18 novembre	22 août	22 septembre
	1896		
Décintrement	28 janvier		9 décembre
Épreuves	23-24 mars 11 avril		

On a condamné les articulations : aux clefs, le 18 mars 1896 ; aux naissances, peu après le 24 mars ; inauguré et ouvert à la circulation, le 27 avril 1896.

9. Quantités.

Pierre de taille	1.568mc
Béton	16.058mc
Pierres de l'ancien pont, retaillées	1.618mc
Total	19.244mc

On a employé 3400 tonnes de ciment et 1570 tonnes de chaux.

1. — Pour tenir compte des parties inachevées. La surcharge sur les trottoirs était ainsi de près de 1000k par mq.

10. Personnel. — *Projet* [5] *et Direction des Travaux (en régie) :* M. Constant Butticaz, Ingénieur, Directeur des Services industriels de la Ville de Genève.

Calculs : M. Bois, Ingénieur du Service des Eaux.

Conduite des Travaux : M. de Haller, Ingénieur.

Décoration : M. Bouvier, Architecte de l'Exposition de Genève.

5. — Le projet a été examiné par M. Karl von Leibbrand, de Stuttgart, auteur du pont de Munderkingen $\overline{A}'$ r^te ($\geqslant 40^m$)[1], puis choisi entre plusieurs par MM. Ritter, professeur au Polytecnikum de Zurich et Ed. Elskes, Ingénieur à Lausanne.

SOURCES :

S_1. — Pièces qu'a bien voulu me communiquer M. Butticaz (juin 1910) :

S'_1. — Mémoire sur le projet et l'exécution ;

S''_1. — Dessins.

S_2. — Génie Civil, 27 juin 1896, p. 129 à 132, Pl. IX : « *Le pont de la Coulouvrenière.* « *Nouveau pont en béton sur le Rhône à Genève* », M. Berthier, Ingénieur.

S_3. — Ce que j'ai vu — été 1901.

Texte : Ce qui n'est pas spécifié S_2 ou S_3 est de S_1.
Dessins : f_1 est réduit de S'_1 ; les autres dessins, de S_2.

VOÛTES

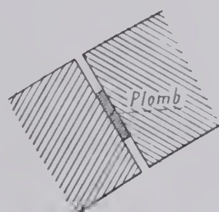
ARTICULÉES

C'EST-A-DIRE ARTICULÉES DE FAÇON PERMANENTE,
SOUS LE POIDS MORT, LES SURCHARGES,
POUR LES VARIATIONS DE TEMPÉRATURE....

ARTICULATIONS

SUR

PLOMB



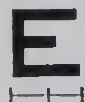
Symbole :



VOÛTES ARTICULÉES

ARTICULATIONS SUR PLOMB [1]

ELLIPSES



PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES

SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

Série E^{n} F^{r} ($\geqslant 40^{m}$)

1. — Pour le classement des voûtes articulées et le sens des symboles, voir Tome IV, Livre I, p. 28 et 29

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS CHEMIN DE FER

PONT	PROJET							
	ENSEMBLE		GRANDES VOÛTES					
PONT - Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	*Longueur entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Retombées*	BANDES DE PLOMB *Épaisseur* Largeur Clef *Retombées* *Pour les pressions, voir Tome IV, Livre III.*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg $\overline{0^m01}^2$ Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Garching** *Barière* 1907-1908 $\underset{\text{H}}{\mathbf{E}}^n$ F^r (≥ 40m)[1] *3 voûtes en anse de panier de 33m89 à 1/2,65, 41m35 à 1/3,32, 33m95 à 1/2,58.*	*141m95* 6mm 15m93	4m60 *3m80* Fruit : 1/30 0m80	Au-dessus de l'horizontale des naissances: Anse de panier à 9 centres **44m,35** *13m34* $\frac{1}{3,32} = 0,30$ *Rayons à partir de la clef :* *33m70* *26m35* *18m70* *Au-dessous du plomb des reins.* [6] *15m50* *6m80* [6] Au-dessus du plomb des reins Arc d'anse de panier à 5 centres **38m,55** *7m23* $\frac{1}{5,33} = 0,187$	**1m,10** *Pas de renflement au joint de rupture* 1m75	*8mm* 38cm *83cm*	B[1] « Brückencement » « Stuttgarter Cementfabrik » de Blaubeuren.... 1v Sable .... 2v5 Gravier .... 2v5 Pierre cassée .. 2v5 Sommiers des articulations : B[1] 1v - 2v - 2v résistant à 400k/$\overline{0^m01}^2$	Pression maxima : 26k » 8160k/1mc	1° Évidement ovale au-dessus des piles 2° *Tympans striés de joints creux horizontaux*

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, nº 6.
6. — La courbe est prolongée au-dessous des naissances jusqu'au socle.

A VOIE NORMALE — SÉRIE E^{n} Fr (≥40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE

FONDATIONS *…ture du sol* …rofondeur …us l'étiage Pressions sur le sol … kg 0m01² *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDES VOÛTES — CINTRES — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER **Q** DÉPENSE **D** Totaux et par unité de surface utile S_p [3], de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
…s gravier …nde fine Piles …G – 6m30 …D – 6m17 Pression … base des …es : 13k …e sol de …ation 4k3 *Caisson …ton armé …scendu …r havage* Culées …G – 3m28 …D – 2m78 Pression sur le sol fondation : 3k16 *P…otis …s noyées …s du béton*	Fixe Montants et contrefiches » Vérins à vis	4 *18c* 1m235 *80mm*	12217f Pour chaque arche de rive : 6664f	48f2	A pleine épaisseur par tranches de 2 à 3m de largeur	Tympans et couronnement achevés *51 jours* 27 juin	t_c 39mm t'_v = 15mm Arches de rive: RG t_c 30mm, t'_v 6mm; RD t_c 20mm, t'_v 23mm	Q = 3600mc Q : S_p = 5mc51 Q : W = 0mc36 **D = 310968f** D : S_p = 476f2 D : W = 31f0 D : Q = 86f4

…r le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la cirlacution
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $E^n\ F^r (\geqslant 40^m)$

MONOGRAPHIES

PONT SUR L'ALZ, A GARCHING[1] *(BAVIÈRE)*

Ligne de Mühldorf à Freilassing

1907-1908 $E^n\ F^r (\geqslant 40^m)\ 1$

Φ_1 (S_3)



1. Quelques observations. — Sauf les parements des piles au-dessous des hautes eaux, qui sont en brèche grossièrement appareillée, tout est en béton (S_1).

1. — Près de la station de Garching, vers Freilassing.

f_1 — Ensemble — 1^{mm}

f_2 — Arche centrale — 2^{mm}

f_3 — Coupe en long — $2^{mm}5$

f_4 — Coupe en travers sur l'axe d'une pile — $2^{mm}5$

f_6 — Couronnement — 1^{cm}

f_5 — Plan au-dessus d'une pile — $2^{mm}5$

Les fondations sont pour deux voies ; l'élévation, pour la voie aval seule (f_4).

L'énorme tore et le gros chaperon qui couronnent les piles sont bien lourds [2], surtout sous un évidement.

Ceux d'amont ne sont que posés : si l'on construit le pont amont, on les déplacera (S_1).

Les quarts de cône coupent de façon fâcheuse les derniers évidements (S_3).

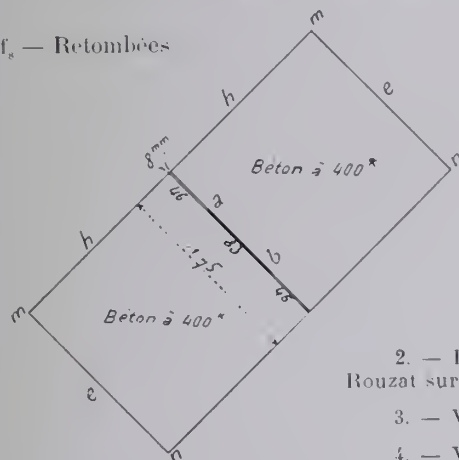
Φ_2 (S_3)



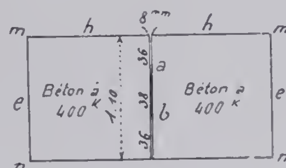
2. Articulations sur plomb [3] (S_1). — Ce sont les plus grandes voûtes articulées sur bandes de plomb.

Articulations. — Bandes de plomb et sommiers = 15mm

f_8 — Retombées



f_7 — Clef



Les sommiers ne sont pressés par le plomb que sur *ab*. Sur l'autre face *mn*, à cause du porte-à-faux sur *ab*, il y a tension.

Pour la réduire, il faut *h* assez grand.

$h = \frac{e}{2}$ a paru insuffisant : on a pris $h = e$. [4]

2. — Il y en a d'assez semblables, - mais moins gros, - au pont de Rouzat sur la Sioule (1855).

3. — Voir les expériences sur le plomb, Tome IV, Livre I, p. 8.

4. — Voir les expériences de M. Krüger, Tome IV, Livre I, p. 18.

3. Effort limite admis sur les sommiers en béton (S"₁). — Le béton des sommiers résiste à 400k.

Pour un effort réparti sur toute sa surface, on n'eût pas dépassé $\frac{400^k}{8} = 50^k$.

Mais, comme il n'est pressé que sur une partie de cette surface, on a accepté un effort limite de $\frac{400^k}{5} = 80^k$.

4. Résistance du béton (S_2). — La Direction des Chemins de fer imposait la résistance à 28 jours, à charge par l'Entreprise de trouver le dosage.

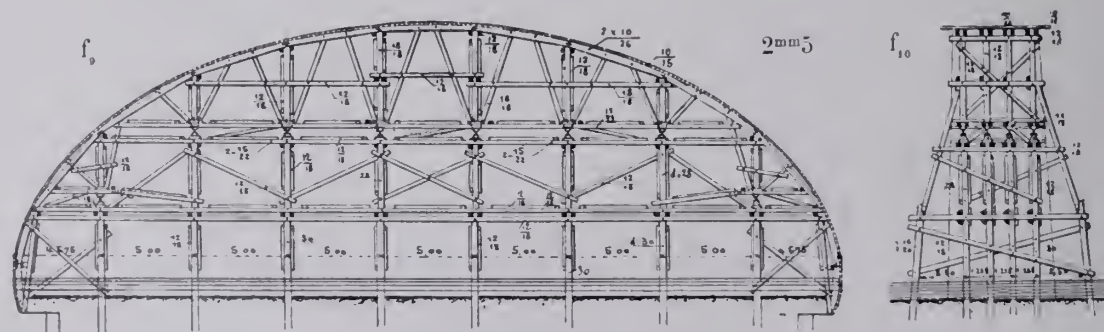
Voici le résultat des essais faits sur des cubes prélevés en cours d'exécution (S_2) :

Composition du béton fait à la machine, à la consistance de terre humide — 1 vol de « Brückencement »[5] de la « Stuttgarter Cementfabrik » de Blaubeuren : Sable de l'Alz lavé, trié, de 0 à 7mm ; on y a remis le fin, enlevé au lavage	Gravier de l'Alz de 10 à 60mm trié et lavé	Pierre cassée de 10 à 50mm	Résistance exigée à 28 jours	Charge de rupture à	Kg	Épreuves faites :
3,5	7	»	150k	15 j 28 j 159 j	166k 170k 264k	sur les chantiers
Piles						
3	5	1	200k	6 j 33 j 138 j	228k 274k 375k	(sur les chantiers) au Laboratoire d'Essais de l'Ecole Polytechnique de Stuttgart
Fondations						
2,5	2,5	2,5	240k	6 j 69 j 153 j	195k 305k 400k	sur les chantiers au Laboratoire d'Essais de l'Ecole Polytechnique de Stuttgart
Corps des voûtes						
2	1	1	400k	7 j 28 j 36 j 154 j	321k 318k 369k 445k	sur les chantiers au Musée industriel de Nuremberg au Laboratoire d'Essais de l'Ecole Polytechnique de Stuttgart
Sommiers des articulations						

Les faces des cubes essayés à Stuttgart étaient exactement dressées.

La pression était toujours exercée dans le même sens que le pilonnage.

5. Cintre (S_1).



5. — Finesse : 16 à 18 % de résidu au tamis de 5000 mailles.

6. Fondations (S_1). — On a descendu par havage un caisson en béton armé, à l'aide d'une drague installée dessus[6].

Ses déplacements en plan n'ont pas dépassé 14^{cm}.

7. Personnel (S_1). — *Projet et Direction Générale des Travaux :* M. Beutel, Ingénieur en chef de la Construction à la Direction générale des Chemins de fer bavarois, à Munich.

Entrepreneurs : MM. Sager et Wœrner, de Munich.

6. — Système proposé par M. Probst, Ingénieur en chef de l'Entreprise.

SOURCES :

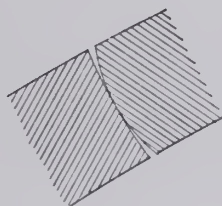
S_1. — Dessins d'exécution (S'_1) et renseignements (S''_1) gracieusement communiqués par M. l'Ingénieur en chef Beutel.

S_2. — « *Mitteilung über die Druckfestigkeit von Betonkörpern, hergestellt während dem* « *Bau der gewölbten Bogenbrücken der Hauptbahn Mühldorf-Freilassing.... aus Brückencement* « *der Stuttgarter Cementfabrik Blaubeuren.* »

Essais certifiés par M. l'Ingénieur en chef Beutel, le 11 décembre 1908.

S_3. — Ce que j'ai vu — août 1909.

ARTICULATIONS ROULANTES [1]



Symbole : [2]



Voir Tome IV, Livre I :
1. — p. 10, pour la définition de l'articulation roulante,
2. — p. 28, pour le sens du symbole.

VOÛTES ARTICULÉES

ARTICULATIONS ROULANTES [1]

ELLIPSES [1]

E [1]

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES

SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

Série $E^n F^r$ (⩾ 40^m) [1]

1. — Pour le classement des voûtes articulées et le sens des symboles, voir Tome IV, Livre I, p. 28 et 29.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS CHEMIN DE FER

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	PROJET — ENSEMBLE: *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans* *sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	GRANDES VOÛTES — INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Joints de rupture* Retombées	ROTULES *Pour les dimensions, rayons, pressions,... voir Tome IV, Livre III*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1 mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg $\overline{0^m01}^2$ Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Chemnitz** *Saxe* 1898-1900 E^n F^r (> 40m)[1] *11 voûtes en anse de panier: 1 de 27m90; 6 de 26m65; 1 de 13m10; toutes articulées.*	*370m5* 10mm 17m	» *1m00* *entre bandeaux* » »	Anse de panier à 9 centres Entre appuis : 43m,10 » »	1m,10 *1m50* 1m25	Granit	Béton Ciment........ 1 Sable.......... 4 Pierre cassée.. 4,5		1° Pas d'évidements 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6.

A VOIE NORMALE SÉRIE E^n 1re ($\geqslant 40^m$)

TABLEAU SYNOPTIQUE

FONDATIONS: ...ture du sol / Profondeur ...s l'étiage / Pressions sur le sol kg 0^m01^2 / *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDES VOÛTES — CINTRES — FERMES: Type / *Matière* / Appareils de décintrement	FERMES: Nombre / *Épaisseur* / Ecartement d'axe en axe / *Surhaussement*	Cube de bois / Poids de fer / Dépenses: Totaux	Cube de bois / Poids de fer / Dépenses: par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT: État d'avancement du pont / *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* / Date	TASSEMENTS DE LA CLEF: sur cintre t_c / au décintrement t'_v / après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q / DÉPENSE D / Totaux et par unité de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
...ravier	Fixe Contrefiches isolées Vérins	5 20^{cm} 0^m95 *Clef : 80^{mm}* *Retombées au moins 20^{mm}*						

...le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE E^{n} F^{r} $(> 40^{m})$

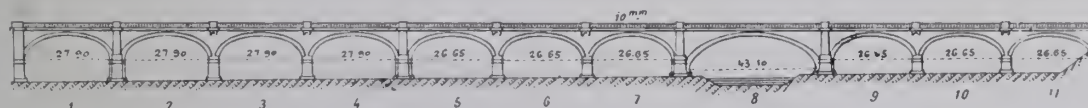
MONOGRAPHIES

PONT SUR LA CHEMNITZ, A CHEMNITZ *(SAXE)*

Ligne de Kieritzsch à Chemnitz[1]

1898-1900 — E^{n} F^{r} $(> 40^{m})^{1}$

f_1 — Ensemble — $0^{mm}4$



Φ_1^{2} (S_2)

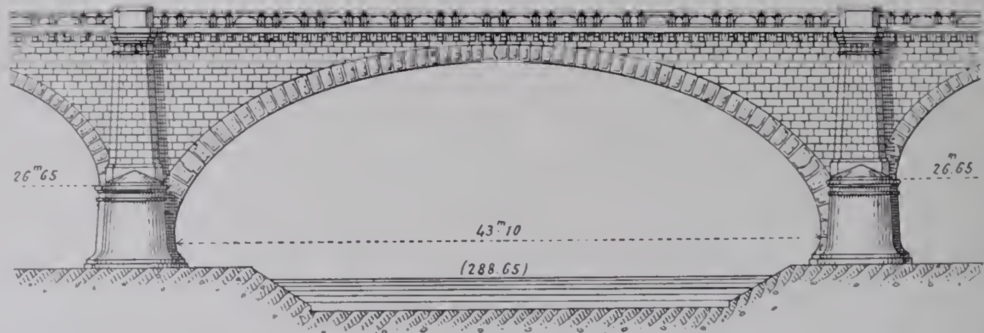


1. — Pour une voie de marchandises.

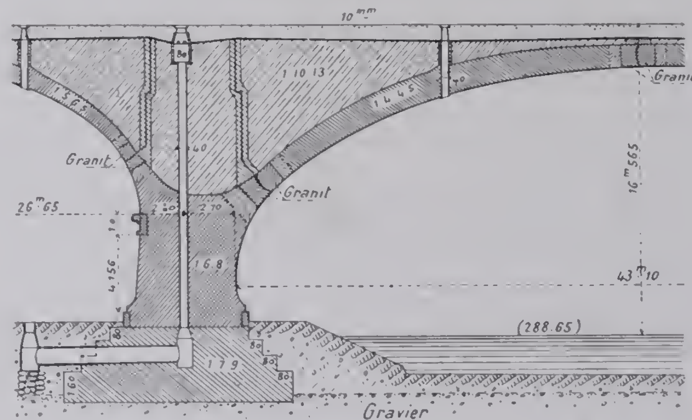
2. — Voûte n° 3 de f_1.

1. Matériaux. — Tout est en béton, sauf :
les rotules, qui sont en granit ;
le couronnement, les chaperons, les cordons au-dessus des piles, qui sont en grès.
Les têtes sont en mortier de ciment coloré, jouant la pierre de taille.

Grande voûte
f_2 — Élévation — 2mm



f_3 — Coupe en long — 2mm5



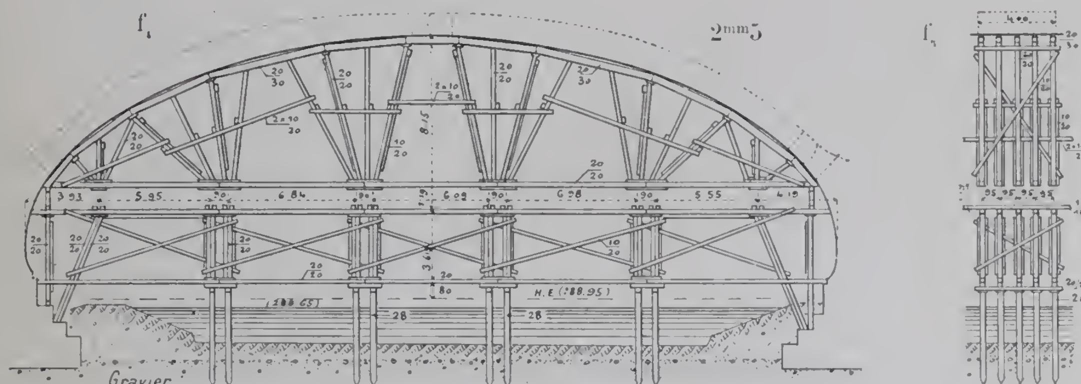
2. Articulations et joints de dilatation. — Les 11 voûtes sont articulées sur rotules de granit.

Au-dessus des rotules des reins, un joint vide coupe les tympans : on le voit un peu trop.

3. Béton.
Composition. Efforts.

	Composition Pour 1v de ciment		Pression en Kg 0^m01^2		
	Sable	Pierre cassée	permise	fissurant des cubes de 40cm âgés de : 13 semaines	1 an
Fondations	7v	9v	»	169k	180k
Piles et parements	6v	8v	13k5	183k	232k
Tympans	10v	13v	»	118k	137k
Voûtes de 26m65 et 27m90	5v	6v5	25k	208k	260k
Voûtes de 43m10	4v	4v5	28k5 pas de tension	253k	Pas de fissure pour 311k

4. Cintre.



5. Epreuve de la grande voûte (29 juin 1901).

		Tassement de la clef	Déplacements transversaux
Sous 5 locomotives de 42^T	immobiles	$0^{mm}8$	»
	passant lentement	$0^{mm}2$ à $0^{mm}6$	»
	passant vite	»	$0^{mm}5$ $0^{mm}25$ à chaque tête
Sous 1 locomotive de 42^T passant vite		»	$0^{mm}3$

6. Personnel.

Direction : Chemins de fer de l'Etat saxon.
Projet et Entreprise : MM. Dyckerhoff et Widmann, de Dresde.

SOURCES :

S_1. — Documents qu'a bien voulu me communiquer M. le Professeur Otto Colberg, de Hambourg — février 1912 :

S'_1. — Dessins.

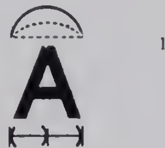
S''_1. — Notice publiée par la maison Dyckerhoff et Widmann, pour l'Exposition de Dusseldorf en 1902, — p. 31 à 34.

S_2. — Ce que j'ai vu — août 1908.

VOÛTES ARTICULÉES

ARTICULATIONS ROULANTES [1]

ARCS PEU SURBAISSÉS [1]



PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

Série A[1] Fr (⩾ 40m)

1. — Pour le classement des voûtes articulées et le sens des symboles, voir Tome IV, Livre I, p. 28 et 29.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER

PONT - Date Symbole	PROJET ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	 Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	GRANDE VOÛTE INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons*	 ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Joints de rupture* Retombées	 ROTULES *Pour les dimensions, rayons, pressions,... voir Tome IV, Livre III.*	 MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1 mc de sable, de chaux ou de ciment*	 PRESSIONS en kg $\overline{0^m01}^2$ Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENT DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Kempten** *Barière* 1906 *1° Ponts aval* *2 Ponts jumeaux, écartés de 10cm, sur fondation commune* $\overset{\frown}{A}$[1] Fr (> 40m) 1 et 2	*Ponts aval* *153m 11* 10mm RD RG 33m25 étiage	 16m75 *16m 00* *1 voies* Fruit : 1/45 0m80	Au-dessus des naissances : Arc d'anse de panier à 11 centres **63m,80** *25m,758* $\frac{1}{2,477}$ = 0,403 *Rayons :* *à partir de la clef* *37m706* *89m25* *38m403* *26m187* *au-dessous des rotules :* *20m39* *34m22* Au-dessus des rotules : **50m,60** *8m 85* $\frac{1}{5,517}$ = 0,174	1m,35 *2m 00* Aux articulations de retombées, Corps : 1m85 Têtes : 2m60	Rotules d'acier moulé, appuyées sur des sommiers de béton moulé	Entre rotules B[1] damé Ciment......... 1v Sable.......... 2v5 Pierre cassée... 5v Résistance en cubes de 30c, à 28 j. : 291k Sommiers des rotules B[1] moulé Ciment.......... 1v Sable........... 2v Gravier basaltique..... 2v Résistance à 90 j. : 478k Pieds-droits, sous les rotules 1 Ciment et : Sable / Pierre cassée Sommet 3 / 6 Base 4 / 8 Fondations 5 / 9	 Pression maxima : 35k Pression maxima : 66k Pression maxima : 26k 19k 8k2	1° Pas d'évidem[...] au-dess[...] de l'arc articulé. Rempliss[...] en béton m[...] à 1 : 12 2° [...]
2° Pont amont $\overset{\frown}{A}$[1] Fr (> 40m) 3	*Pont amont* » 10mm RG RD 31m39 étiage	 8m25 *7m 50* Fruit : 1/45 »	Au-dessus des naissances : **64m,30** *27m 576* $\frac{1}{2,339}$ = 0,428 *Rayons :* *au-dessous des rotules* *20m39* *36m12* Le reste comme aux Ponts aval			Ciment Dyckerhoff et fils, de Karlsruhe	Surcharge par mct de voie : Locomotives : 8160k Wagons : 3810k	

1) — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6.

A VOIE NORMALE SÉRIE Â' Fr (⩾ 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol kg 0m01² *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] { de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Rocher Pression maxima : 8k 2	Retroussé sur 36m80 *Au dessus des rotules* *Bois* *Au-dessous* *Fer* Vérins de 30T travaillant normalement à 22T	6 25cm 1m55 *Surhaussement* *Bois : 50mm* *Fer : 23mm*	Pour un seul cintre : 275mc » 74040f	 0mc 42 » 114f2	A pleine épaisseur en 16 tranches	Voûtes nues *Partie entre rotules* *42 jours* *Au-dessous* *14 jours plus tard*	*Ponts ural :* *1er Pont :* t'_v 29mm *2e Pont :* t'_v 3mm Tassements totaux à comparer avec le surhaussement	*Pour les 3 ponts :* Q = 23800mc *Pour les ponts jumeaux :* $\frac{2Q}{3} : S_p = 6^{mc}27$ $\frac{2Q}{3} : W = 0^{mc}25$ *Pour les 3 ponts :* D = 1426500f *Pour les ponts jumeaux :* $\frac{2D}{3} : S_p = 370^f1$ $\frac{2D}{3} : W = 15^f0$ *Pour les 3 ponts :* D : Q = 59f9

Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets
Pour S, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES ARTICULÉES   ARTICULATIONS ROULANTES

ARCS PEU SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\widehat{A}^{1}$ F^{r} ($\geqslant 40^{m}$)

MONOGRAPHIES

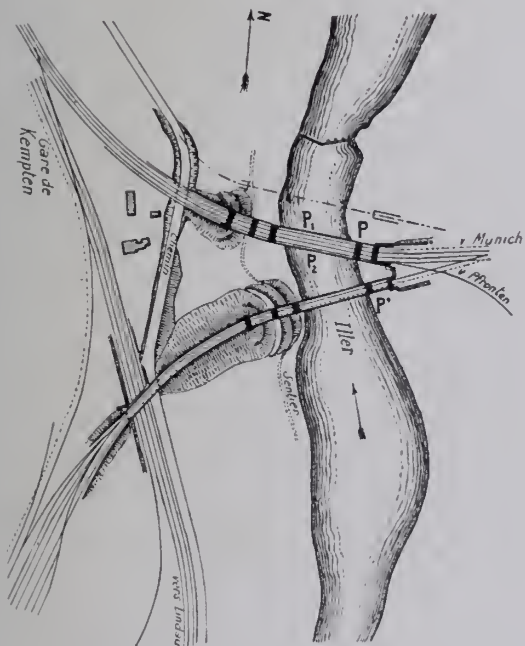
---

3 PONTS SUR L'ILLER, PRÈS DE LA GARE DE KEMPTEN *(BAVIÈRE)*

1906 $\widehat{A}^{1}$ F^{r} ($\geqslant 40^{m}$) 1, 2, 3

1. Emplacement des trois ponts (f_1). — La ligne Munich-Kempten traversait l'Iller, d'abord sur une poutre Howe en bois, puis sur un pont en fer devenu à son tour insuffisant pour les nouvelles machines.

f_1 — Plan d'ensemble — $0^{mm}15$



Pour le remplacer, on a construit :

en P (f_1), deux ponts à 2 voies P_1, P_2, de même portée : $63^{m}80$; de même largeur entre têtes : $7^{m}95$; à 10^{cm} l'un de l'autre, sur fondation commune (S_2) ;

en P', un troisième pont à deux voies, à $1^{m}82$ (S_2) plus haut que les ponts P, de $64^{m}50$ de portée, de $7^{m}50$ de largeur entre têtes.

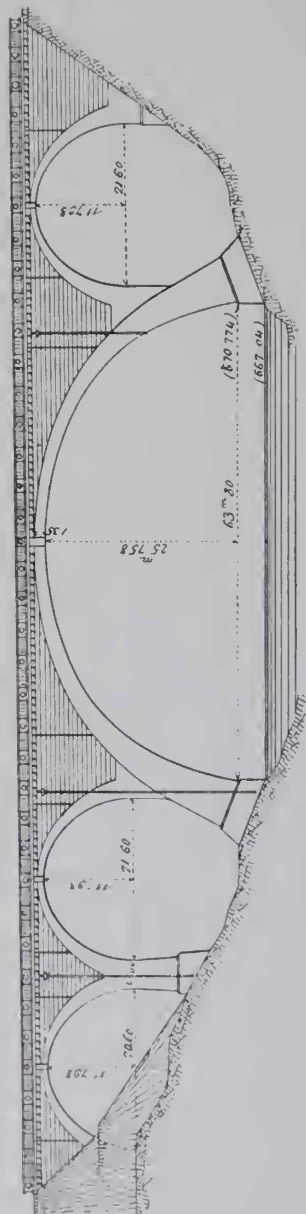
2. Dispositions communes. Les 3 ponts sont en béton.

Les voûtes, grandes et petites, sont articulées à la clef et aux reins ; toutes sont en arc sur culées en surplomb.

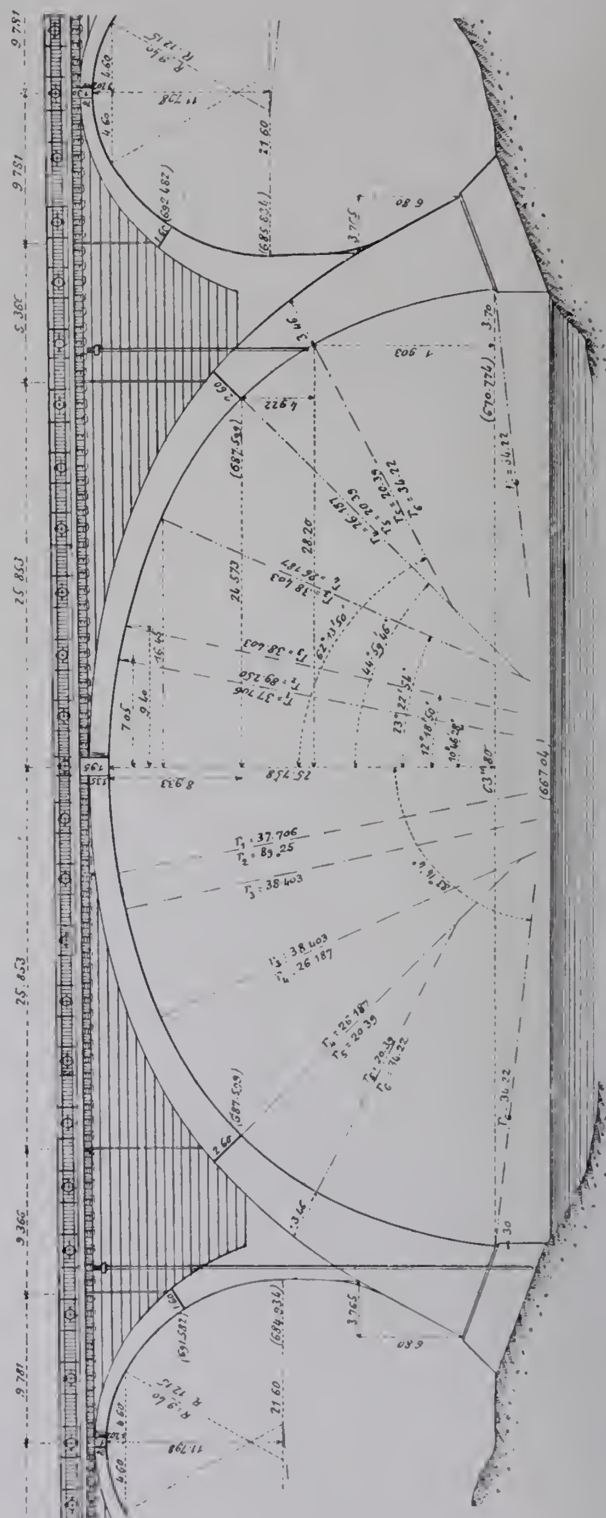
Il est très évident qu'on ne s'est pas préoccupé de l'aspect (S_3).

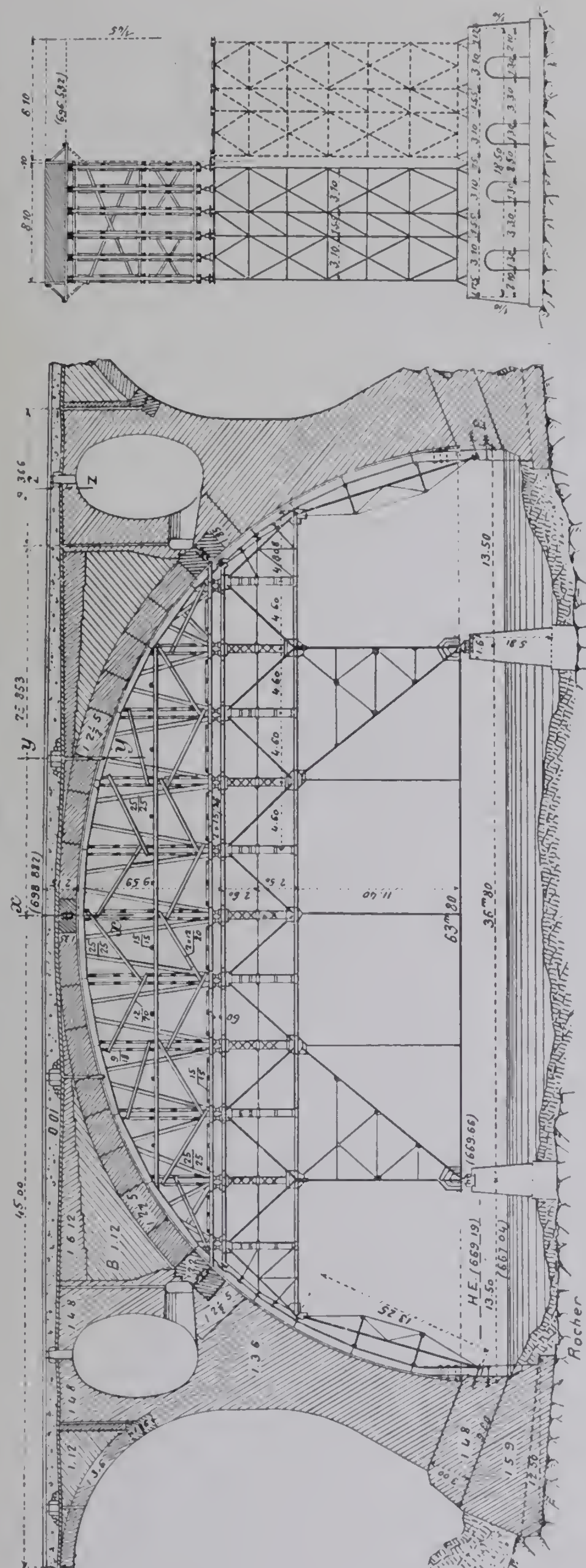
Ponts aval P (P_1, P_2 — f_1)

f_2 — Ensemble — 1mm



f_3 — Grande voûte — 2mm

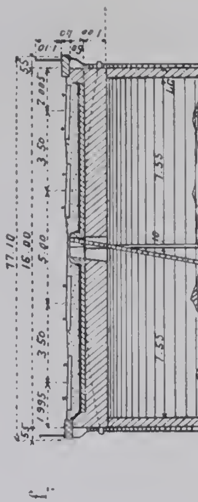




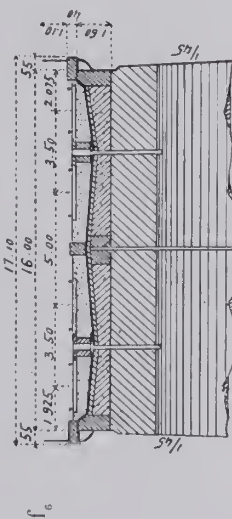
f_5 — Coupe en travers sur xx de f_4 — 2mm

f_4 — Coupe en long et cintre — 2mm

Coupes en travers



f_7 sur zz de f_4 — 3mm



f_6 sur yy de f_4 — 3mm

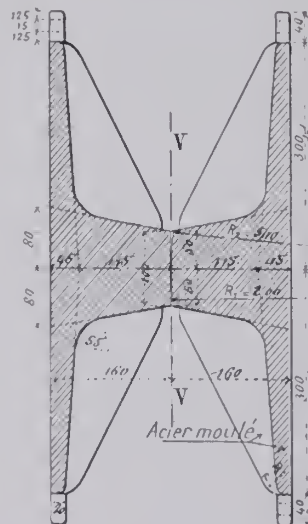
Φ_1 (S_3) — A gauche, les deux ponts aval P_1, P_2 ; à droite, le pont amont P' (f_4)



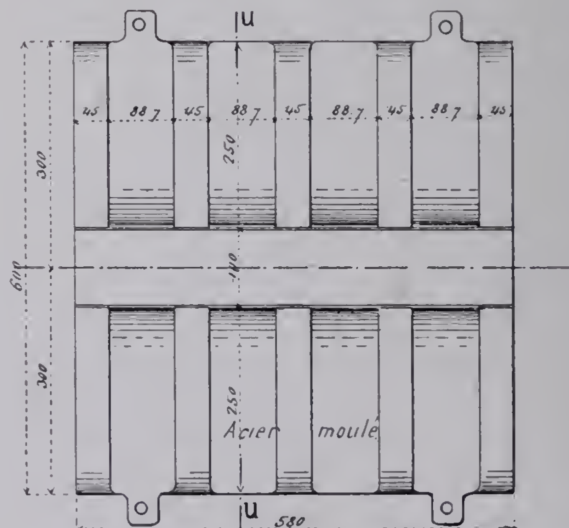
3. Articulations des grandes voûtes (f_8 à f_{11}).

Rotules — 10cm

f_8 — Coupe sur *uu* de f_9



f_9 — Vue sur *vv* de f_8



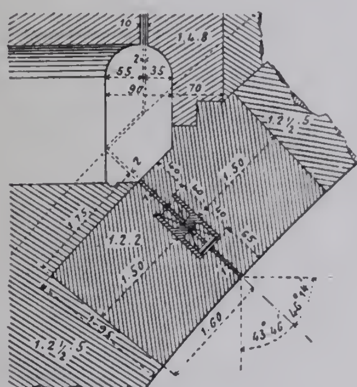
Φ_2 (S_3) — Pont amont P' (de f_1)



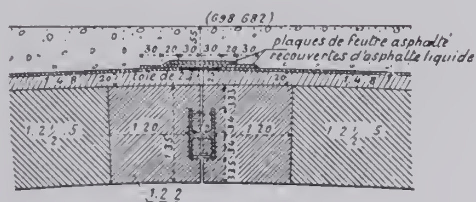
4. Joints de dilatation des tympans. — Au-dessus des rotules, les tympans et le remplissage sont coupés par des joints de dilatation de 2^{cm}, fermés par une tôle galvanisée de 2^{mm} d'épaisseur, 60^{cm} de largeur, recouverte de deux feuilles de feutre asphalté (f_{11}).

Rotules et sommiers — 1^{cm} (S_2)

f_{10} — Retombées



f_{11} — Clef



5. Sommiers en béton des rotules. — On avait imposé à l'Entreprise une résistance de 400k à 28 jours.

Voici le résultat des essais :

A. — Cubes de béton de 30cm :

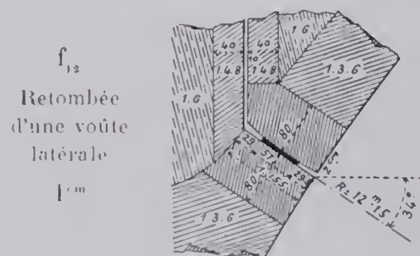
Composition 1vol ciment Dyckerhoff et fils et : Sable (7mm) Provenance	Dosage	Gravier ou Pierre cassée (1/3 de 7 à 15mm ; 2/3 de 15 à 25mm) Provenance	Dosage	Résistance à l'écrasement, en Kg/$\overline{0^{m}01}^{2}$ à 28 jours, avec sable : non lavé	à 28 jours, avec sable : lavé	à 90 jours, avec sable : non lavé	à 90 jours, avec sable : lavé
Heising	1	Pierre cassée basaltique d'Immendingen	1 1/4	348	372	418	468
	1 1/2		1 1/2	346	367	432	447
	2		2	*343*	*350*	*443*	*478*
	1	Dolomite de Pfronten	1 1/4		329		390
	1 1/2		1 1/2		314		381
	2		2		283		351
	1	Gravier de Heising	1 1/4	344	324	406	401
	1 1/2		1 1/2	313	317	374	393
	2		2	304	311	344	389
basaltique d'Immendingen	1	Pierre cassée Basalte	1 1/4	339	343	444	489
	1 1/2		1 1/2	282	339	401	494
	2		2	241	331	352	469

B. — Cubes de mortier de 10cm :

1 vol. ciment Dyckerhoff et fils et :	Dosage				
Sable de Heising	2 1/2	457	462	542	521
	4	371	314	397	466
Pierre écrasée de Heising	2 1/2	304		369	
	4	261		284	
Dolomite écrasée de Pfronten	2 1/2	330		408	
	4	267		331	
Sable de Heising et dolomite écrasée de Pfronten par moitié	2 1/2	368		431	
	4	273		309	

On a accepté 350k au dosage 1v, 2v, 2v *(chiffres en italiques du tableau A).*

6. Articulations sur plomb et joints de dilatation des voûtes latérales. — Ces voûtes sont articulées par des bandes de plomb[1] de 8mm d'épaisseur, 35cm (S_1) de largeur à la clef et 57cm aux retombées, posées entre des sommiers de béton : elles travaillent à 29k par $\overline{0^{m}01}^{2}$ à la clef, à 48k aux reins.



f_{12}
Retombée d'une voûte latérale
1cm

1. — Aux essais faits à Munich, des plaques carrées du même plomb, de 10cm de côté, 8mm d'épaisseur, ne cédaient qu'à 425k.

7. Cintre. — Le cintre, pesant 250 tonnes, a été déplacé parallèlement, du pont P_1 sous le pont P_2, puis démonté et remonté sous le pont P' (f_1).

Il était calculé pour supporter une fois 1/2 le poids des voûtes.

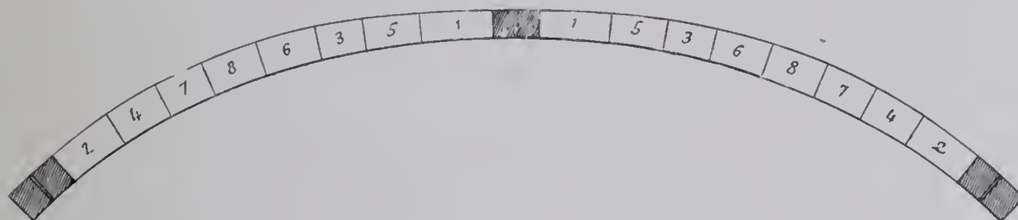
L'effort limite admis par $0^{m}01^{2}$ était :

pour le fer		1200^{k}
pour le bois	dans le sens des fibres	28^{k}
	dans le sens perpendiculaire	12^{k} [2]

On n'a pas chargé le cintre.

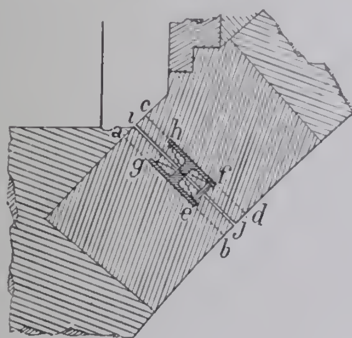
8. Exécution des grandes voûtes. — Chaque grande voûte a été construite à pleine épaisseur, en 16 tranches symétriques, chaque tranche en une seule journée, dans l'ordre des chiffres de f_{13}.

f_{13} — Ordre d'exécution des tranches — $2^{mm}5$



Pendant la construction, les deux parties d'une même rotule étaient solidarisées par des boulons de 16^{mm}.

f_{14} — Bétonnage entre les sommiers d'articulation 1^{cm} (S_2)



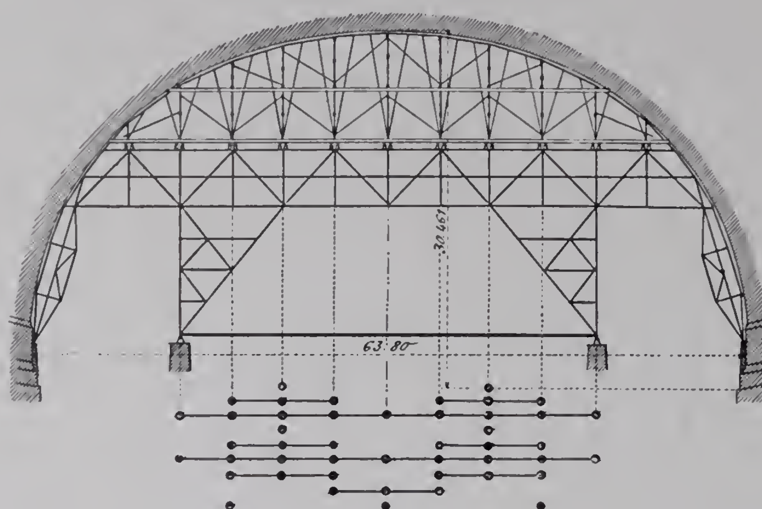
Avant de bétonner l'intervalle entre les lits *ab* et *cd* (f_{14}), on réservait, suivant le lit *ij* de contact des rotules, un intervalle libre de $1^{cm}05$, par des plaques de liège de 1^{cm} entre feuilles de zinc de $0^{mm}25$. Quand le béton arrivait aux boulons condamnant les rotules, on les sciait, puis on achevait de bétonner.

9. Décintrement. — On décintra entre rotules, avant de construire les tympans, 6 semaines après le clavage, en allant du milieu de chaque demi-voûte vers sa clef et vers sa retombée[3].

2. — Au Pont Cornélius [A^II 1te (> 40m) 3], les semelles s'étaient écrasées sous 26^{k} (S_2).

3. — C'était considérer l'arc à 3 articulations comme formé de deux voûtes à 2 articulations.

f_{13} — Marche du décintrement — 1mm5



Les points réunis par un trait horizontal sous le croquis f_{13} ont été abaissés en même temps de la même quantité.

On ne constata pas de fissures.

14 jours après, on décintra au-dessous des rotules.

Au décintrement, les voûtes travaillent à 18k7 à la compression et à 1k4 à la traction.

10. Quantités. — Voici le cube du béton employé dans les 3 ponts :

Fondations	4.500mc
Pieds-droits avec leurs appuis	11.000
Grandes voûtes	2.500
Petites voûtes	1.600
Tympans et remplissage	4.200
Total	23.800mc

11. Personnel.

Projet et Direction générale des Travaux : M. Beutel, Ingénieur en chef de la Construction à la Direction Générale des Chemins de fer bavarois, à Munich.

Direction immédiate : M. Gumprich, « Regierungs-Rat » à Kempten ;
M. Endres, « Genal Diron Rat » à Munich.

La partie métallique du cintre a été projetée et exécutée par les Etablissements de construction de ponts de Gustavsburg (Usines réunies d'Augsbourg et Nuremberg).

Entrepreneurs : Ponts P_1, P_2 (de f_1) : MM. A. Kunz et Cie, de Kempten ;
Pont P' (de f_1) : MM. Dyckerhoff et Widmann, de Karlsruhe

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution gracieusement remis par MM. Beutel et Kunz.

S_2. — Deutsche Bauzeitung, 1906, 21 avril, p. 219 à 222 ; — 28 avril, p. 232 à 236 ; — 12 mai, p. 261 à 264 : « *Die Illerbrücken bei Kempten in Allgäu* », von Regierungs-Baumeister a. D. Colberg, Direktor der Firma Dyckerhoff und Widmann, Karlsruhe.

S_3. — Ce que j'ai vu — août 1908.

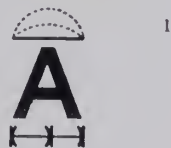
Ce pont a été décrit dans le Génie Civil du 16 février 1907, p. 257 à 260, Pl. XVI : « *Ponts en béton à « 3 rotules, sur l'Iller, à Lautrach et à Kempten (Bavière)* » A. C.

Texte : Ce qui n'est pas spécifié S_3 est de S_2.
Dessins : Ils sont réduits de S_1 et rectifiés d'après S_2 pour les modifications en cours d'exécution.

VOÛTES ARTICULÉES

ARTICULATIONS ROULANTES[1]

ARCS TRÈS SURBAISSÉS[1]



[1]

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS ROUTE

Série **A**[1] r^{te} (> 40^{m}) [1]

1. — Pour le classement des voûtes articulées et le sens des symboles, voir Tome IV, Livre I, p. [illegible] et [illegible]

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

PONT - Date Symbole	PROJET							
	ENSEMBLE		GRANDE VOÛTE					
	Longueur *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Joints de rupture* Retombées	ROTULES *Pour les dimensions, rayons, pressions,... voir Tome IV, Livre III.*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg : $\overline{0^m01}^2$ Surcharges supposées	1° ÉVIDEMEN[T] DES TYMPANS 2° *DÉCORATI[ON] DES TÊTE[S]*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Grasdorf** *Hanovre* 1899-1900 $\overline{A}^1$ r^{te} (⩾ 40m) 1	*64m* 20mm 20mm Palier sur 4m à la clef 6m75	6m00 *6m 00* Pas de fruit 0m40	Arc de cercle. Entre appuis : **40m,00** *4m 50* $\frac{1}{8,88}$ = 0,112 Entre axes des rotules : **40m,386** *4m 518* $\frac{1}{8,93}$ = 0,111 *46m 694*	0m,85 *1m 16* 0m90	Granit	B [1] Ciment Portland 1v Sable de la Leine 2v5 Basalte cassé... 4v Résistance : à 42 j........ 178k à 96 j........ 228k	Pression maxima dans la voûte : 37k Surcharges : 2 tuyaux de conduite ; 400k 1m² ; Voiture de 20T à essieux de 1m50 espacés de 4m	1° 10 voûte[s] transversa[les] vues, en plein ci[ntre] 8 de 1m3[.] 2 de 1m40 sur piles de 0m[.] 2°
de **Göhren** *Saxe* 1903-1904 $\overline{A}^1$ r^{te} (⩾ 40m) 2	*76m 90* 35mm 35mm7 9m50	5m40 *5m 40* Pas de fruit 0m60	Arc d'anse de panier. Entre appuis : **60m,00** *6m 75* $\frac{1}{8,88}$ = 0,112 Entre axes des rotules : **60m,56** *6m 80* $\frac{1}{8,89}$ = 0,112	1m,10 *1m 50* 1m20	Granit	Voûte en petits moellons Aux têtes, crépi simulant de grandes PT [1] *Ciment — 0mc 1*	Pressions : sans surcharge : MAX. / MOY. Clef 31k / 30k1 Joints de rupt 30k6 / 28k5 Retombées 33k5 / 28k1 avec surcharge : MAX. / MOY. Clef 35k7 / 34k9 Joints de rupt 39k1 / 37k8 Retombées 40k2 / 33k1 400k 1m² Rouleau de 30T	1° 6 voût[es] transver[sales] vues, en plein c[intre] de 2[.], 2m40, 2[.] sur pi[les] 0m90 et 1[.] 2°
de la **Wallstrasse** à **Ulm** *Wurtemberg* 1904-1905 $\overline{A}^1$ r^{te} (⩾ 40m) 3	*90m 50* 10mm 44mm Palier sur 5m à la clef 15m07 (sol)	10m00 *8m 80* Fruit : 1/20 0m64	Anse de panier à 7 centres. Entre appuis : **65m,448** *11m 942* $\frac{1}{5,48}$ = 0,182 Au-dessus des rotules : Arc d'anse de panier à 5 centres **57m,00** *5m 80* $\frac{1}{9,827}$ = 0,101 *Rayons à partir de la clef 60m, 80m, 20m au-dessous des rotules 5m*	1m,06 *1m 60* 1m50	Acier moulé	B [1] Ciment........ 1v de Blaubeuren Sable du Danube 3v Pierre cassée calcaire...... 5v Densité : 2400k Au voisinage des articulations : Ciment........ 1v Sable .... 1v Pierre cassée... 2v5 (porphyre) Densité : 2300k	Pression maxima : 40k Sur les trottoirs : 450k 1m² sur la chaussée : 400k 1m² Rouleau à vapeur de 18T	1° Plate for[me] de 16[.] en bétonn[é] sur piliers ca[.] de 30 à [.] d'arête, en béton [.] 2°

1 Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. 11, n° 6

SÉRIE $\overline{A}^1$ r^te^ (⩾ 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0m01² *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle ²	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité de surface utile S_p ³ / de volume « utile » W ⁴
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Gravier sablonneux 30 au-dessus e la marne Pression : 4k à 5k ans tenir compte de la ssée des terres	Fixe Montants et contrefiches *Sapin* Boites à sable (grillé) placées entre billots la veille du décintrement	5 *18cm* 1m45 *90mm*			A pleine épaisseur, en 16 tranches symétriques construites à partir des retombées Béton pilonné par couches horizontales de 20cm	Tympans achevés *19 jours* 12 septembre	t_c = 55mm t'_v = 24mm t''_v = 32mm (129 j.)	Fondations : 1050mc Élévation : 2000mc Q = 3050mc Q : S_p = 7mc94 Q : W = 1mc09 D = 113 158f (Forfait) D : S_p = 294f7 D : W = 40f4 D : Q = 37f1
Rocher (Granulite) -4m à -7m50 s le terrain Pressions AXIMA : 8k9 oyenne : 8k2 *Batardeau à double enceinte*	Fixe Montants et contrefiches » Coins	6 *20cm* Fermes interm. : 1m00 / 1m03 Fermes de rive : 1m08 *122mm*	Cintre 141mc Palées 30mc 171mc	0mc51	A pleine épaisseur, en 6 tronçons	Voûte nue *12 jours* 1er et 2 décembre	t_c = 66mm t'_v = 31mm3 t''_v = 10mm7 (3 j.) Recul des culées (moyennes de l'amont et de l'aval) R D 0mm47 R G 0mm71	Q = 2099mc Q : S_p = 5mc05 Q : W = 0mc57 D = 72 226f D : S_p = 173f9 D : W = 19f5 D : Q = 34f4
Bon calcaire jurassique » Pression maxima : 8k »	Fixe Montants et contrefiches » Boites à sable	8 *25cm* 1m40 *90mm*	400mc y compris les cloisons de tête » 29000f le bois restant à l'Entrepreneur	0mc58 » 42f2	A pleine épaisseur, en 28 tranches symétriques	Ouvrage presque entièrement achevé *63 jours* »	t_c Clef 12mm / Jts de rupt. 15mm et 18mm dû en partie à la compression du sable des boites t'_v 7mm4 Recul des culées : Nord 0mm2 Sud 0mm3	Q = 4340mc Q : S_p = 5mc01 Q : W = 0mc44 D = 195 836f D : S_p = 216f4 D : W = 19f0 D : Q = 43f1

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation. 4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

PONT - Date - Symbole	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* entre abouts des parapets Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	ENSEMBLE Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	GRANDE VOÛTE INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Joints de rupture* Retombées	ROTULES *Pour les dimensions, rayons, pressions,... voir Tome IV, Livre III.*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg (0m01)² Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENT DES TYMPANS 2° *DÉCORATIO[N] DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Élise à **Neubourg** *Barière* - 1906–1907 A[1] r[le] (≥ 40m)[1]	*80m 10* 12mm 12mm Palier sur 8m à la clef 8m 45 étiage	8m 90 *8m 70* Pas de fruit 0m 40	Arc avec raccord vertical aux retombées: Portée entre culées : 47m,30 Entre axes des rotules : 43m,30 *4m 10* $\frac{1}{9,886} = 0,101$	0m,95 *1m,20* 1m 15	Rotules d'acier moulé prises dans des sabots en fonte appuyés sur des sommiers de granit	Bandeaux : PT [1] Muschelkalk *Ciment — 325k* Douelle et Queutage : B [1] Ciment...... 1v Sable....... 2v 1/3 Pierre cassée et gravier. 4v 2/3	Pression maxima : sans surcharge : Clef : 25k Joints de rupture : 21k5 Retombées : 22k avec surcharge : Clef : 27k Joints de rupture : 35k7 Retombées : 24k5 500k 1m² et Rouleau à vapeur de 20T	1° 8 voûtes transversal[es] biaises, cachées, en arc, de 2m40 d'ouvertur[e] biaise, sur piles de 0m40 2° »

1 — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, page 11, n° 6.

SÉRIE A[1] r[te] (⩾ 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE *(Suite)*

FONDATIONS	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES		CINTRE — Cube de bois, Poids de fer, Dépenses		MODE DE CONSTRUCTION	**DÉCINTREMENT**	**TASSEMENTS** DE LA CLEF	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER **Q** — DÉPENSE **D**
Nature du sol Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg/0m01² *Procédé*	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Ecartement d'axe en axe *Surhaussement*	Totaux	par mq de douelle [2]		État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	Totaux et par unité de surface utile S_p [3], de volume « utile » W [4].
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Rocher » Pression maxima : Avec surcharge: 5k1 Sans surcharge: 4k4 »	Fixe Montants et contrefiches » Vérins à vis	8 » 1m16 *80mm*	260mc	0mc62	A pleine épaisseur, par tranches de 1m50 à 3m50	Voûtes d'évidement construites	t_c = 40mm t'_v 24mm	Béton : 1920mc Maçonnerie . 300mc **Q = 2 220mc** Q : S_p = 3mc11 Q : W = 0mc39 **D = 209 780f** D : S_p = 94f3 D : W = 36f7 D : Q = 94f5

our le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A* 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES ARTICULÉES   ARTICULATIONS ROULANTES

ARCS TRÈS SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\overline{A}^1$ r^{te} ($\geqslant$ 40^m)

MONOGRAPHIES

PONT SUR LA LEINE, PRÈS DE GRASDORF[1] *(ALLEMAGNE - Hanovre)*

Route reliant l'usine d'alimentation de la Ville de Hanovre

à la Route de Hanovre à Hildesheim

1899-1900 $\overline{A}^1$ r^{te} ($\geqslant$ 40^m) 1

Φ_1 (S''_1)



1. — à 8k3 du village.

1. Grande voûte. — C'est un arc en béton à 3 articulations de granit.

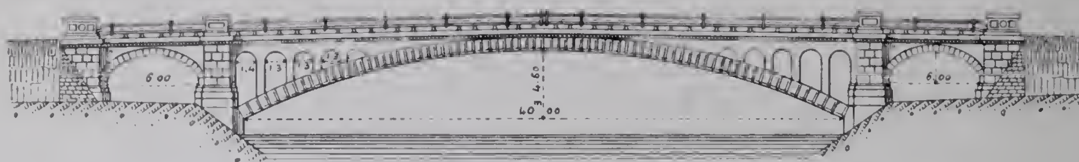
On a fait une grande arche pour ne pas relever les hautes eaux, qui atteignent déjà le village de Grasdorf.

On a adopté le béton parce qu'on avait, sur place, d'excellent sable.

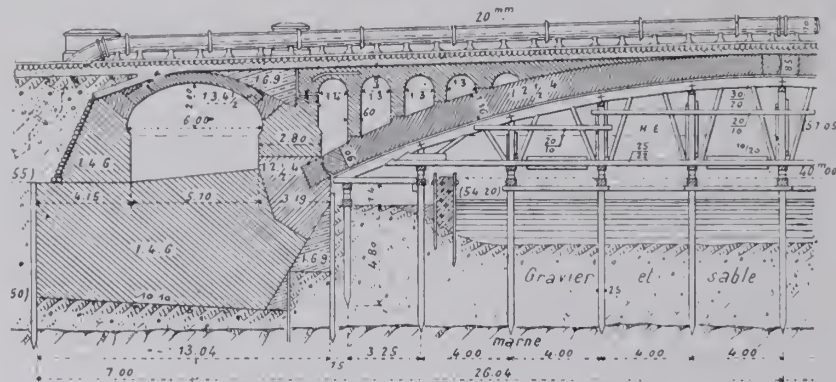
L'intrados est en arc de cercle. L'extrados est renflé en arc d'anse de panier à 7 centres.

Les bandeaux de la voûte et les pilastres sont à forts bossages et joints simulés : les tympans, à surface lisse.

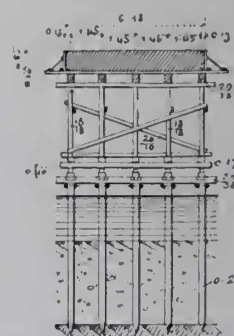
f_1 — Élévation — 2mm



f_2 — Demi-coupe en long et cintre — 3mm



f_3 — Coupe en travers du cintre — 3mm

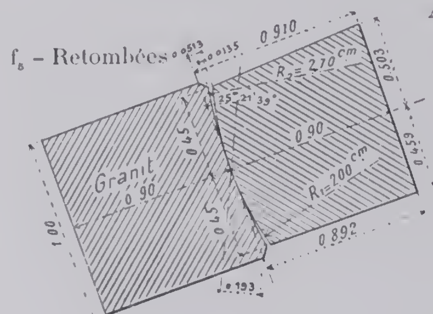


2. Articulations (f_4, f_5). — Elles sont du type arrêté et décrit par M. Köpcke[2], type « *qui s'est fort bien comporté dans nombre d'ouvrages* » (S_2).

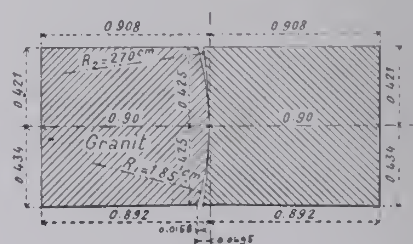
Les faces courbes sont polies sur environ 50cm.

Articulations — 25mm

f_5 – Retombées



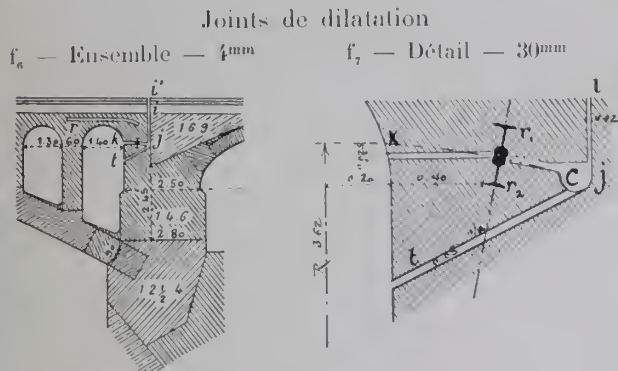
f_4 — Clef



2. — Zeitschrift des Architekten-und Ingenieur-Vereins zu Hannover, — vol. XXXIV, - 1888, - p. 373 à 380 · « *Über die Verwendung von drei Gelenken in Steingewölben* », vom Geh. Finanzrath C. Köpcke zu Dresden ».

3. Joints de dilatation (f_6, f_7). — La retombée sur la culée de la dernière voûte d'évidement est coupée par un joint vide *kjii'* (f_6).

Joints de dilatation
f_6 — Ensemble — 4mm f_7 — Détail — 30mm



6 coupons de vieux rails *r* (f_6) arrêtent la poussée.

Dans le béton sont encastrés deux vieux rails r_1, r_2 (f_7) ; leurs champignons, qui doivent glisser l'un sur l'autre, sont polis, – celui de r_1 suivant un plan, – celui de r_2 suivant un cylindre dont le rayon est la distance à la ligne de contact de la rotule des retombées.

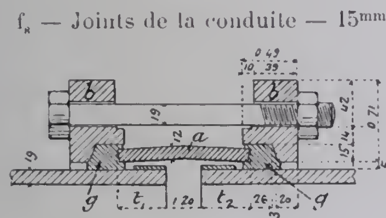
r_2, pris dans la culée, reste immobile avec elle.

r_1 est entraîné avec la grande voûte : il tourne autour de l'axe de la rotule de retombée, lequel n'est sans doute pas exactement fixe dans l'espace puisqu'il y a roulement, mais qu'on peut considérer comme tel.

4. Joints mobiles du tuyau de conduite d'eau. — Le pont porte la conduite d'alimentation de Hanovre.

Pour qu'elle puisse se dilater librement, et aussi pour suivre les mouvements de la voûte, elle est, au droit de chacune des 3 articulations, coupée par un joint mobile [3] ainsi disposé (f_8) : un anneau en fer forgé *a* recouvre l'intervalle de 20mm à 30mm entre les tuyaux t_1, t_2. Il est pris entre deux colliers de caoutchouc *g* par les anneaux de fonte *b*, serrés par des boulons.

f_8 — Joints de la conduite — 15mm

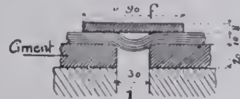


5. Ecoulement des eaux. — Sur une couche de ciment, est posée une feuille de feutre de 4mm entre deux couches de 3mm d'un mélange d'asphalte, de mastic d'asphalte et de goudron de houille. Les eaux s'écoulent suivant l'axe du pont sous un fer Zorès entouré de gros graviers.

Au droit des joints de dilatation, la chape est renforcée de feuilles alternées de carton et de plomb, courbées pour en suivre le jeu. Le tout est protégé par un fer plat *f* (f_9).

Si de l'eau entrait dans le joint de dilatation *i* (f_6, f_7, f_9), elle sortirait par le tuyau *t* (f_6, f_7).

f_9 — Chape au-dessus des joints de dilatation — 15mm



Sous les voûtes d'évidement, une chape en ciment rejette l'eau vers les têtes.

3. — Système Ch. Gibault, employé sur nombre de conduites d'eau et d'air comprimé. Génie Civil, 21 janvier 1893, p. 181 à 187 : « *La dérivation de la Vigne* », R. Andras.

f_{10} — Coupe en travers à la clef — 1mm5

6. Chaussée et trottoirs (f_{10}).

La chaussée de 2m80 est en vieux pavés de la ville de Hanovre, avec joints bourrés de mastic d'asphalte (12k par m. q.).

La conduite est posée le long d'un trottoir : il y a la place pour en poser une autre le long de l'autre trottoir.

7. Plinthes et dés.

— Les plinthes sont en béton moulé. Leurs surfaces vues sont enduites de mortier coloré.

Les dés surmontant les pilastres sont aussi en béton moulé : leur noyau creux a été rempli de béton maigre.

8. Parements simulant le granit.

— On a donné l'aspect du granit aux têtes, et aux plinthes, en les lavant à l'acide chlorhydrique étendu, qui met à nu le gravier.

9. Matériaux.

A. Ciment. — On a employé pour le corps de l'ouvrage du ciment Portland « Vorwohler », et pour les têtes, du ciment « Stern » à cause de sa couleur.

B. Gravier du lit de la Leine. — Il contenait 0,4 de sable à arêtes vives et 0,6 de pierres de diverses grosseurs.

C. Pierre cassée. — Dans le basalte cassé, il y avait 45,5 % de vides.

D. Béton. — Le cahier des charges n'en fixait pas la composition. Il devait résister à la compression, à 28 jours :

pour les culées, à 124k ; pour les voûtes, à 207k.

Voici, avec les dosages adoptés, les densités et résistances (voir f_2).	Composition (fixée par l'Entreprise) Ciment 1v : Sable	Pierre cassée	Gravier	Densité moyenne	*Age moyen au moment de l'épreuve*	Efforts moyens en kg $\overline{0^m01}^2$ produisant : des fissures	la rupture
Grande voûte	2v5	4v	»	2447k	*96j*	214k	228k
Haut des culées de la grande voûte, sur 3m comptés suivant la courbe de pression					*42j*	169k	178k
Voûtes de rive et haut de leurs culées	3v	4v5	»	2453k	*94j*	226k	247k
Le reste des culées de la grande voûte	4v	»	6v	2267k	*63j*	135k	138k
Piles-culées des voûtes de rive					*119j*	124k	133k
Voûtes d'évidement, tympans					»	»	»
Remplissage sur les reins des voûtes de rive	6v	»	9v	»	»	»	»

Ces essais ont été faits au Laboratoire de Charlottenbourg, sur des cubes de 20^{cm} et 40^{cm}, en béton prélevé au moment de l'emploi.

Il était plus comprimé que le béton de l'ouvrage.

On a fait à la machine presque tout le béton de la grande voûte.

E. Granit des rotules. — C'est du granit bleu à grain fin des carrières d'Edenstetten (canton de Deggendorf, forêt de Bavière), étudié déjà par M. Max Leibbrand à l'occasion du projet de pont articulé, en béton, sur l'Eyach à Imnau, exécuté en 1896 [4].

Des essais de résistance avaient alors été faits à Stuttgart par M. C. von Bach et à Munich par M. le Professeur Föppl [5].

On avait trouvé :

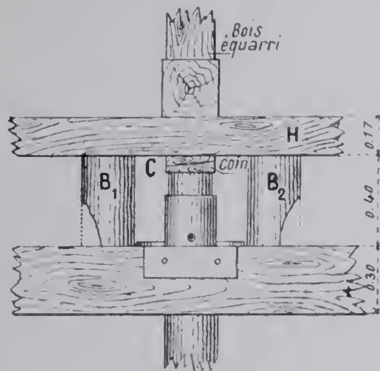
Densité moyenne		2.640^k
Résistance moyenne, en kg/$\overline{0^m01}^2$:	à l'écrasement	1.099^k
	à l'arrachement (éprouvettes de 100$^{cm^2}$ de section moyenne)	46^{k}9
	à la flexion (prismes de 105^{cm} de long et 15^{cm} × 15^{cm} de section)	86^{k}6
	au choc (cylindres de 40^{cm} de long, 13^{cm} de diamètre, prolongés à chaque extrémité par une partie prismatique de 15^{cm} × 15^{cm} de section)	80^{k}2

Aux essais faits à Stuttgart, sur des cylindres de granit de 50^{cm} et 75^{cm} de long, pour des efforts de 134^k à 186^k, les modules d'élasticité ont varié de $1{,}43 \times \overline{10}^9$ à $2{,}15 \times \overline{10}^9$.

10. Appareils de décintrement (f_{11}). —

On devait, comme au pont de Claix [6], faire porter chaque poteau du cintre sur deux billots B_1, B_2 ; puis, la veille du décintrement, installer entre B_1 et B_2 une boîte à sable serrée contre la semelle H par des coins en chêne C ; enfin, au décintrement, ruiner d'abord B_1, B_2 à coups de hache, puis enlever le sable des boîtes.

f_{11}
Appareil de décintrement
30^{mm}



Mais la semelle H étant trop faible avec 17^{cm}, on fit porter chaque poteau du cintre sur 3 billots (B_1, B_2 et un 3e, B_3, entre eux). La veille du décintrement, on remplaça B_3 par une boîte à sable.

4. — arc de 30^m au I 10. — Zeitschrift für Bauwesen, 1898, p. 187 à 205, Pl. 26 : « *Betonbrücke mit « Granitgelenken über die Eyach bei Imnau in Hohenzollern* », vom Landesbaurat Max Leibbrand, mitgetheilt vom Ober-Ingenieur Alfred Gaedertz. (Voir Tome IV, Livre III).

5. — Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1897, n° 9, M. C. von Bach. - et Zeitschrift für Bauwesen, 1898 (article de M. Gaedertz, cité ci-dessus, renvoi 4).

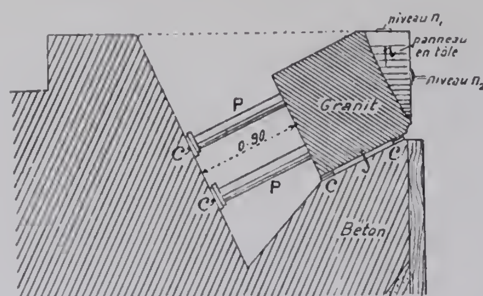
6. — $\overset{\frown}{A}^1$ r^{te} ($\geqslant$ 40^m)5 — Tome III.

Les boîtes à sable voisines des culées étaient à 0m70 en contrebas des autres : pour elles, on abaissa le niveau des eaux à l'intérieur d'un petit batardeau spécial (f_2).

11. Fondations. — On descendit, en épuisant à l'intérieur d'une enceinte de pieux de 8m50 et de palplanches de 8m et 0m16 d'épaisseur, dans le gravier sablonneux surmontant la marne. Les palplanches, trop minces, ne purent l'atteindre et on s'arrêta sur le gravier à 1m30 au-dessus.

12. Exécution de la grande voûte. — *A. Pose des rotules de retombées.* — *A_1. Pose des blocs concaves* (f_{12}). — En bétonnant les culées, on avait ménagé la place de ces blocs et, par derrière, un vide de 0m90.

f_{12} — Pose des blocs concaves des rotules de retombées — 15mm



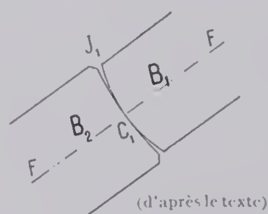
Ceux de rive droite avaient 1m de long et pesaient 2T4 ; ceux de rive gauche avaient 1m20 et pesaient 2T9.

Ils furent posés, à l'aide d'un panneau *p* en tôle d'acier de 1mm d'épaisseur, muni de deux niveaux n_1, n_2, sur 4 paires de coins en fer *c*, et soutenus par des poteaux P et des coins en bois *c'*.

Après la pose de toute la file, on mata avec un fer plat le joint inférieur *j* de 3cm environ, au mortier à l'état de terre humide ; puis on enleva les coins en fer *c* et on bétonna l'espace vide de 90cm en enlevant, au fur et à mesure, les poteaux P et les coins *c'*.

A_2. Pose des blocs convexes (f_{13}). — On avait calculé l'abaissement au décintrement ; on en avait déduit le roulement de B_1 sur B_2, puis la variation d'ouverture Δj_1 du joint j_1.

f_{13} — Pose des blocs convexes des rotules de retombées 15mm



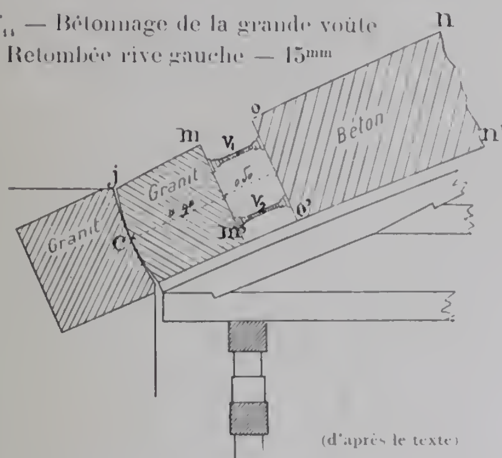
(d'après le texte)

On connaissait donc la valeur de j_1 pour que le contact C_1 fût sur la fibre moyenne FF, et, par conséquent, l'ouverture avant mouvement $j_1 - \Delta j_1$; on l'a fixée par des coins en fer.

On a pu poser ainsi les rotules de telle sorte qu'après le mouvement, C_1 fût sur la fibre moyenne.

B. Bétonnage de la grande voûte. — Après la pose des rotules, le cintre fut chargé, sur 1m de hauteur, de sacs de gravier qu'on enlevait au fur et à mesure du bétonnage.

Immédiatement avant de poser le béton, on revêtait la douelle de 1 à 2cm de mortier, afin de cacher les pierres du béton.



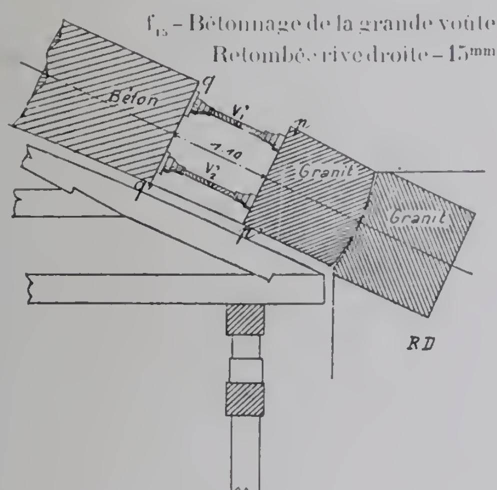
f14 — Bétonnage de la grande voûte Retombée rive gauche — 15mm

Après décintrement, on la dressait et on y étendait un lait de ciment.

Le 4 juillet 1900, on exécuta, côté rive gauche, une tranche $mm'nn'$ (f_{14}) de 2m35, appuyée sur le sommier supérieur de retombée.

Mais on constata le lendemain que, par suite d'un tassement du cintre, le joint sec j d'extrados entre les blocs de granit de la rotule, s'était ouvert de 4mm5, ce qui correspondait à un abaissement du point de contact c de 70mm.

On enleva alors, non sans peine, sur 50cm, le béton $mm'oo'$ (f_{14}) en contact avec le bloc supérieur ; on remit le bloc exactement en place et on le pressa contre le béton par des vérins à vis V_1, V_2.



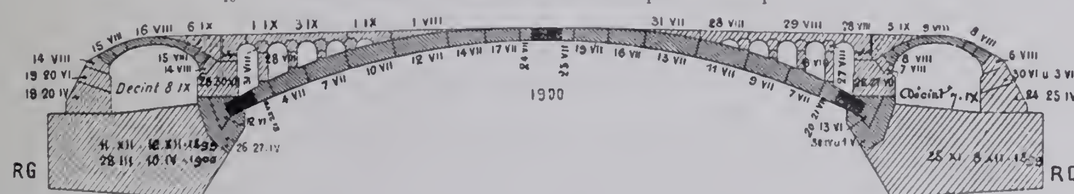
f15 – Bétonnage de la grande voûte Retombée rive droite – 15mm

Puis on commença le bétonnage côté rive droite, après avoir ménagé sur le bloc supérieur d'articulation un vide $pp'qq'$ (f_{15}) de 1m10, au moyen de vérins à vis V'_1, V'_2.

On continua alors, comme l'indique f_{16}, par tranches alternatives sur chaque demi-voûte, jusqu'à 0m86 en arrière de la rotule de clef.

Le béton était pilonné par couches horizontales de 20cm d'épaisseur. Autant que possible, les parties faites chaque jour étaient limitées normalement à la courbe de pression.

f16 — Dates d'exécution des différentes parties du pont — 2mm



En même temps qu'on posait le béton, on pilonnait contre les cloisons de tête une couche de 8cm environ de mortier composé de ciment coloré, de gravier de la haute vallée du Harz, et de sable blanc.

Avant de poser le béton frais, on lavait la surface du béton de la veille et on y projetait du mortier de ciment clair, qu'on étendait vigoureusement au balai.

C. Clavages. — *C_1. – aux retombées.* — Les vérins V_1, V_2 (f_{14}), V'_1, V'_2 (f_{15}) étant fortement serrés, on s'assura, en introduisant une lame d'acier de 2^{cm} de largeur et $0^{mm}2$ d'épaisseur, que les blocs étaient en contact sur toute leur largeur.

On enlevait chaque rangée de vérins lorsque le béton était arrivé à sa hauteur.

Mais lorsqu'on lâcha les vérins supérieurs V_1, V'_1 (f_{14}, f_{15}), le joint d'extrados entre rotules s'écarta, les blocs tournant vers le bas.

On resserra les vérins V_1 (f_{14}) et on les entoura de cloisons de bois montant jusqu'à l'extrados. On bétonna entre les cloisons, puis on enleva les vérins et les cloisons et on remplit les vides.

C_2. – à la clef. — Après tassement au décintrement, l'intrados des blocs d'articulation de clef doit être un arc de cercle *abc* (f_{17}), et le point de contact C sur la fibre moyenne.

f_{17} – Comment doit être l'articulation de clef après décintrement — 15^{mm}



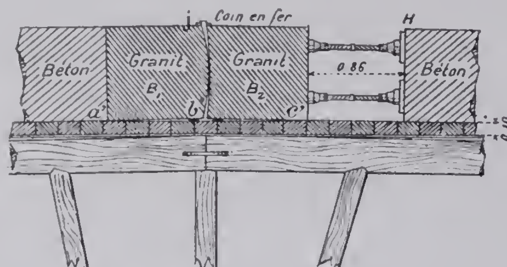
On posa ces blocs sur coins, de façon que leur intrados fût en ogive *a' b' c'* (f_{18}).

La largeur à l'extrados du joint sec *j* était maintenue par un coin de fer à la demande.

Les blocs convexes B_1 (f_{18}) furent posés comme les blocs concaves des retombées sur coins en fer, à l'aide d'un panneau en tôle ; puis on pilonna le béton par derrière.

Le lendemain, on posa les blocs concaves B_2 sur coins ; on les serra par des vérins et on clava la voûte à la clef.

f_{18} — Pose du bloc concave de l'articulation de clef — 15^{mm}



Au moment des clavages, le béton était âgé de :

13 jours à la retombée rive droite ;
17 jours à la retombée rive gauche ;
6 jours à la clef.

La pression des vérins était de 5000^k, répartie sur environ 650^{cmq} (surface d'appui des blocs de bois H) (f_{18}), soit environ 8^k $\overline{0^m01}^2$.

13. Construction des voûtes d'évidement et de décharge. — Après le clavage, on construisit les voûtes d'évidement, les voûtes de décharge et leurs tympans.

Le rail supérieur du joint de dilatation (r_1 de f_7) fut posé à 1^{cm} en arrière de la position indiquée au projet, pour tenir compte des mouvements de la voûte au décintrement.

Le joint horizontal *k j* (f_6, f_7) fut ménagé au moyen d'une couche de 5^{mm} de sable.

Les surfaces de glissement se comportèrent bien au décintrement, quoique le béton des voûtes d'élégissement n'eût que 9 jours.

14. Décintrement. — On vida plus tôt et plus vite les boîtes du centre.

15. Tassements.

			Température moyenne en degrés Centig. du jour de l'observation	Température moyenne en degrés Centig. des 10 jours précédents	Tassements de la clef en mm partiels	Tassements de la clef en mm cumulés
du cintre (1900)	avant le bétonnage	au moment de la pose du cintre (surhaussé de 90^{mm})	»	»	0^{mm}	
		26 juin – avant chargement du cintre	»	»	5	5^{mm}
		2 juillet – après chargement	»	»	13	18
	pendant le bétonnage, de la grande voûte	13 juillet	»	»	4	22
		17 juillet	»	»	0	22
		26 juillet – (après clavage)	+ 28°	+ 23°	14	36
	pendant le bétonnage, des voûtes d'évidement	1er août	+ 19°	+ 21°	4	40
		11 août	+ 16°	+ 17°	2	42
		8 septembre	+ 16°	+ 16°	8	50
de la grande voûte	au décintrement (12 septembre 1900)	avant décintrement, les boîtes à sable mises en place	+ 14°	+ 15°	5	55
		après décintrement	+ 14°	+ 15°	24	79
	pendant l'achèvement du pont (1901)	19 janvier	0°	— 5°	32	111
		13 juillet (temps très sec)	+ 26°	+ 22°	– 12 relèvement	99
		23 août	+ 20°	+ 20°	6	105

On n'a pas pu observer de mouvements horizontaux des culées.

16. Achèvement du pont. — Avant de poser la chape à la clef, on coula de l'asphalte chaud sur 8^{cm} de profondeur à l'extrados du joint d'articulation.

On fit de même aux retombées : de plus, on boucha la partie inférieure du joint avec de la ficelle mince entourée d'une épaisse couche d'asphalte.

17. Dates.

		1899
Commencement des travaux		8 août
Construction des batardeaux	rive droite	30 août – 21 octobre
	rive gauche	23 août – 18 novembre
Bétonnage des culées	rive droite	25 novembre – 8 décembre
	rive gauche	11 et 12 décembre 1899 28 mars – 10 avril 1900

(Les travaux furent suspendus du 13 décembre 1899 au 28 mars 1900, à cause du froid, puis d'une crue).

			1900
Bétonnage de la voûte			4 – 25 juillet
Clavages	aux retombées	rive droite	20 – 21 juillet
		rive gauche	21 – 22 juillet
	à la clef		25 juillet
Décintrement			12 septembre

18. Dépenses. — L'ouvrage a été exécuté à forfait pour 91.700 marks (113.158^f), non compris les tuyaux, les murs en béton soutenant derrière les culées les tuyaux coudés, le pavage, le garde-corps, les remblais et quarts de cône.

19. Personnel.

Ingénieurs :

Direction générale : M. A. Bock, « Direktor der Städtischen Kanalisations-und Wasserwerke », à Hanovre.

Projet et Direction des travaux : M. C. Dolezaleck, « Ingenieur der Städtischen Kanalisations-und Wasserwerke » à Hanovre.

Entrepreneurs : MM. B. Liebold et Cie, d'Holzminden.

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution (S'_1) et photographies (S''_1) que m'a très aimablement adressés M. C. Dolezaleck, en avril 1910.

Les dessins sont extraits de S'_1, sauf f_{13}, f_{14}, f_{15}, f_{17} restitués d'après le texte.

S_2. — Zeitschrift für Architektur und Ingenieurwesen 1901, p. 47 à 54 et 313 à 338, Pl. 3 et 4 : « *Brücke über die Leine bei Grasdorf* », MM. A. Bock et C. Dolezaleck.

Le texte est extrait de S_2.

S_3. — Renseignements gracieusement communiqués par M. B. Liebold, en juillet 1910.

PONT SUR LA ZWICKAUER MULDE, PRÈS DE GÖHREN *(SAXE)*

Route de Göhren à Cossen

1903-1904 $\overline{\mathbf{A}}^1$ r^{te} ($\geqslant$ 40m)2

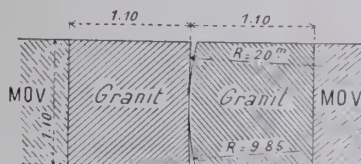
Φ_1 – aval (S_2)



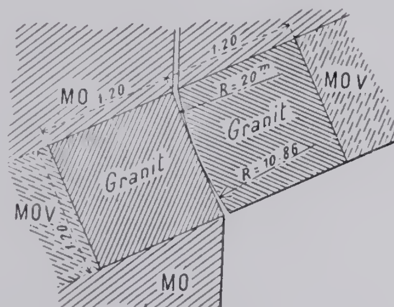
1. Articulations (f_4, f_5).

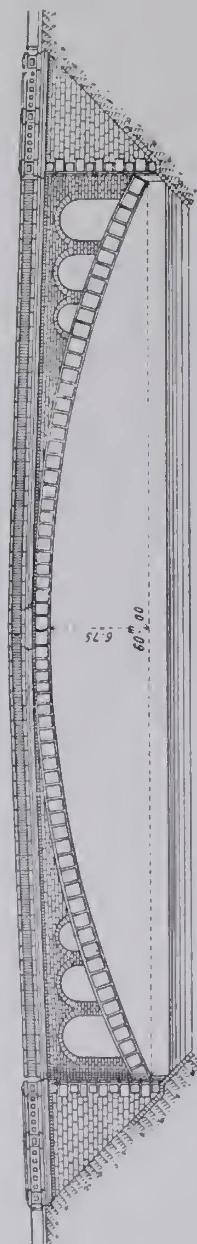
15mm

f_4 — Clef

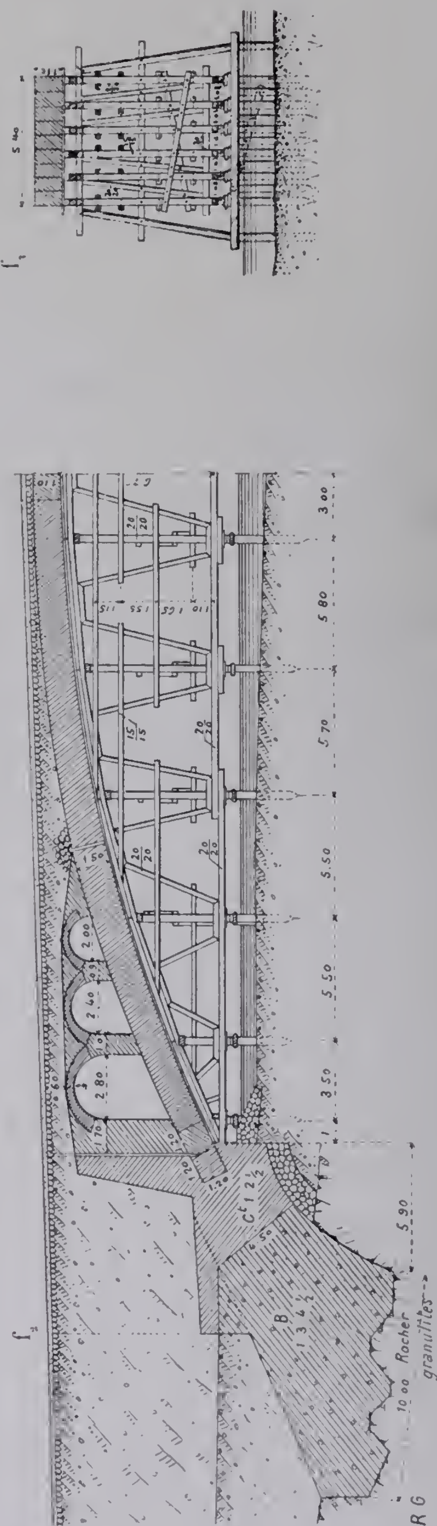


f_5 — Retombées





f₁ — Élévation — 2mm



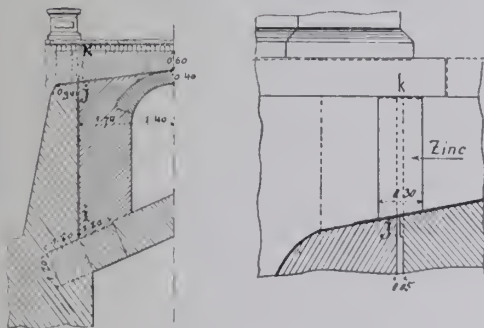
Coupes et cintre — 3mm

Φ$_2$ — aval (S$_2$)



2. Joints de dilatation au-dessus des articulations des naissances (f$_6$, f$_7$).

Joint de dilatation
f$_6$ — Ensemble — 4^{mm} f$_7$ — Détail — 2^{cm}



On a coupé la culée de la dernière voûte d'évidement par un joint vide vertical ijk (f$_6$) de 5^{cm}, masqué en élévation par les murs en retour.

Le haut du joint jk est fermé par une feuille de zinc de 2^{mm} d'épaisseur et 30^{cm} de largeur, qui se relève le long du parement intérieur des tympans (f$_7$).

3. Matériaux et exécution de la voûte.

— On a d'abord étalé sur le platelage du cintre un lit de mortier : la douelle apparaît lisse, sans lits, ni joints.

Aux têtes, on a simulé[1], avec un mortier spécial, des joints de pierre de taille.

La voûte a été construite en 6 tronçons soutenus par des taquets en bois.

1. — Suivant les errements de la maison Liebold. Voir Pont de Plauen $\overset{\frown}{A}^1$ r^{te} (⩾ 40^m)^{10} ; Pont sur la Chemnitz $\overset{\frown}{A}^1$ F^r (⩾ 40^m)^{14} ; Ponts de Silésie $\overline{A}^1$ r^{te} (⩾ 40^m)$^{4 \text{ à } 9}$; $\overline{A}^n$ r^{te} (⩾ 40^m)$^{5 \text{ et } 6}$, Tome III.

4. Dates.

	1903
Commencement des travaux	25 mars
Fondations	6 avril — 10 juillet
Grande voûte	7 — 19 octobre
Décintrement	1er et 2 décembre
	1904
Ouverture à la circulation	16 juin

5. Cube de maçonnerie.

Voûte, sans les sommiers des articulations, — moellons ordinaires lités	431mc
Autres maçonneries, — moellons ordinaires à ciment	885
Béton des culées (1v, 3v, 4v5)	783
Total	2.099mc

6. Personnel.

Projet et Entreprise : MM. Liebold et Cie, de Langebrück (Saxe).

Direction des Travaux : M. Köhler, « Baurat, Vorstand der Strassen-u-Wasserbauinspektion », de Grimma ; M. Matthes « Bauinspektor ».

SOURCES :

S_1. — Renseignements et dessins d'exécution gracieusement communiqués par M. le Directeur de la « Königliche Sächsische Wasserbaudirektion » à Dresde.

S_2. — Ce que j'ai vu — août 1908.

PONT DE LA WALLSTRASSE, A ULM *(BAVIÈRE)*

PRÈS DE LA GARE, PAR DESSUS 13 VOIES DE CHEMIN DE FER

1904-1905 $\overset{\frown}{\underset{\leftrightarrow}{\mathbf{A}}}{}^{1}$ r^{te} ($\geqslant$ 40m)3

Φ_1 (S_3)

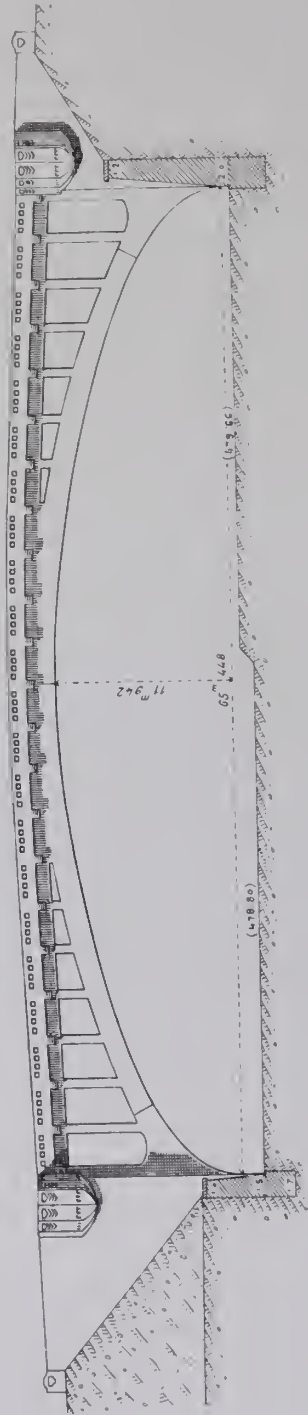


1. Matériaux employés. — La voûte est en béton, à 3 articulations en acier moulé.

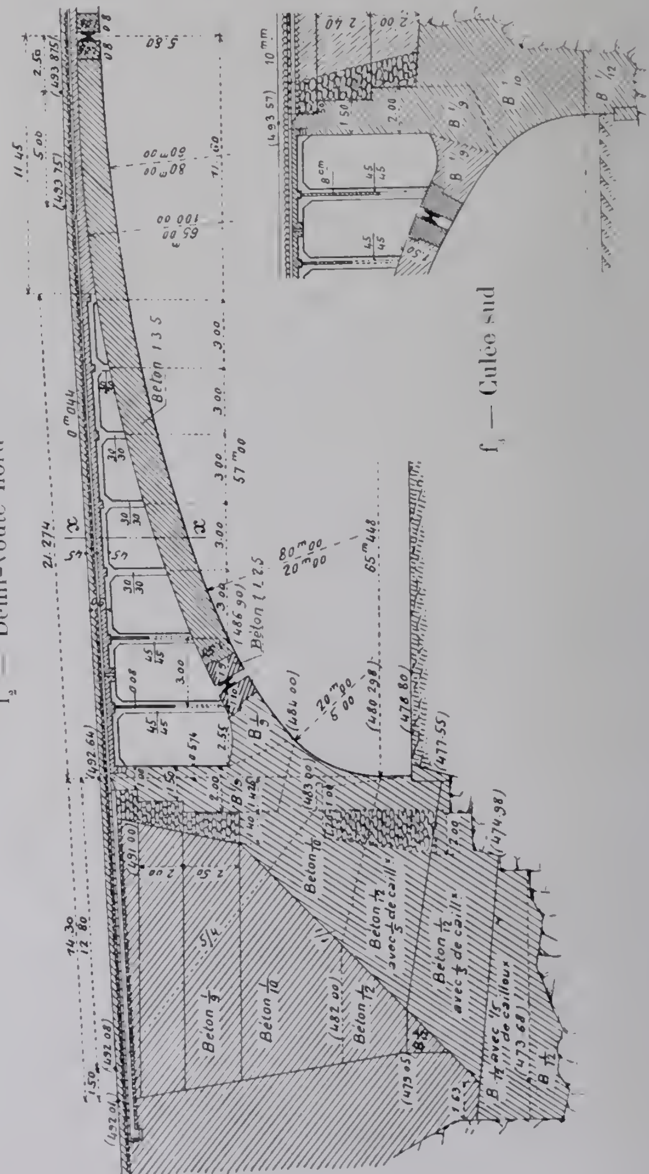
La plate-forme et ses piliers, les consoles sous trottoirs, les parapets, sont en béton armé.

2. Tracé de la voûte. — La fibre moyenne est la courbe de pression sous le poids mort.

Aux retombées, on a raccordé l'intrados aux culées par un petit rayon : leurs rotules sont au-dessus de la fibre moyenne.

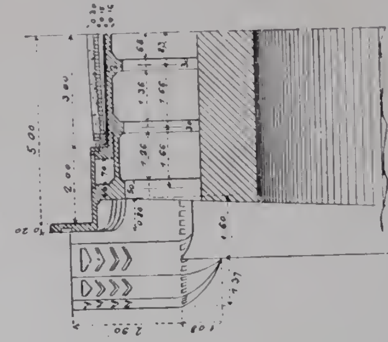


f_1 — Élévation — 2^{mm}

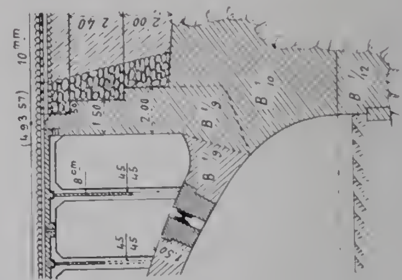


Coupes en long — 3^{mm}

f_2 — Demi-voûte nord



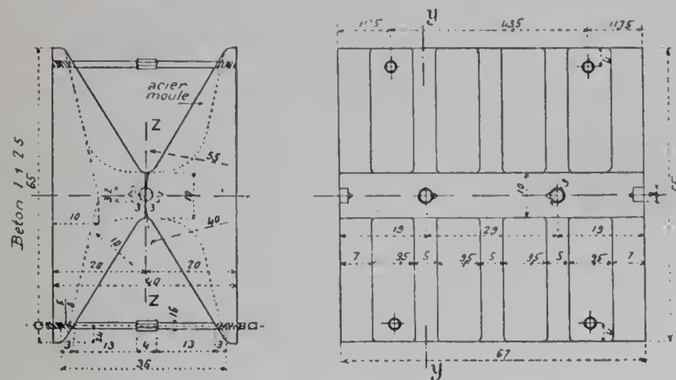
f_4 — Demi-coupe en travers sur xx de f_2 — 5^{mm}



f_3 — Culée sud

Rotules — 6^cm

f_5 — Coupe sur *yy* de f_6 f_6 — Vue sur *zz* de f_5



3. Articulations (f_5, f_6).

— Pour empêcher les blocs d'échapper l'un à l'autre, tout en leur permettant de rouler l'un sur l'autre, on les a réunis par deux goujons d'acier de 30^mm de diamètre, fixés à l'un d'eux, et pénétrant avec jeu dans l'autre.

On voit les rotules en douelle ; elles sont masquées aux têtes par un mince placage en béton, de 14^cm à 15^cm d'épaisseur.

4. Elégissement des tympans (f_1 à f_4). — Le tablier, en béton armé de 16^cm, repose sur des piliers en béton armé de 30^cm × 30^cm à 45^cm × 45^cm. Il n'est pas armé au cerveau.

On a, pour l'aspect, élargi à 60^cm les faces des piliers de tête.

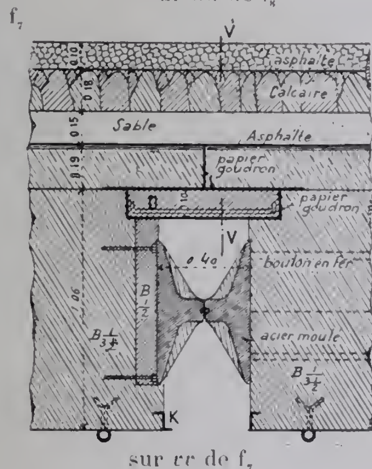
5. Chape (f_7, f_8). — Le tablier est recouvert de 2^cm de mortier de ciment à deux pentes versant vers l'axe, et d'une chape Siebel[1].

Joints de dilatation — 3^cm

Clef

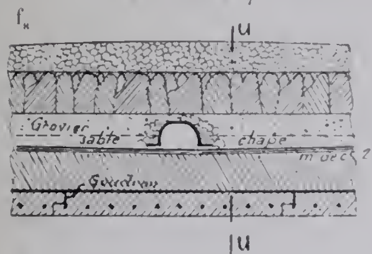
Coupes sur *uu* de f_8

f_7



sur *vv* de f_7

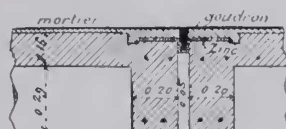
f_8



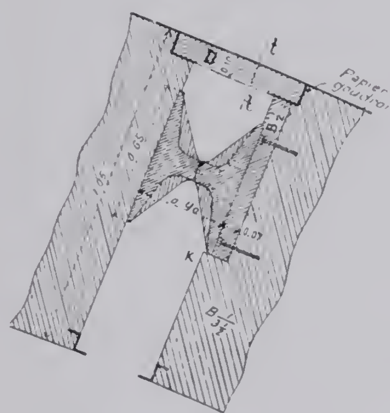
Retombées

Coupes en long

f_9 — Plate-forme



f_{10} — Voûte



f_{11} - Coupe en travers sur *tt* de f_{10}



6. Joints de dilatation (f_7 à f_{11})

Aux retombées, le haut des joints de dilatation du tablier est recouvert d'une feuille de zinc recourbée, dans le creux de laquelle on a versé du goudron (f_9).

La console de clef est coupée par le joint d'articulation.

1. Feuilles de plomb et feutre asphalté.

7. Trottoirs. — Ils sont en béton armé, sur consoles en béton armé, saillant de 0m80.

Cette saillie, rationnelle, fait bon effet (S_3).

8. Parapet. — Le parapet, en béton armé, est plein, avec quelques dessins en creux pour en accidenter la surface : il eût peut-être convenu de l'ajourer.

Malgré les joints ménagés, on y remarque (août 1908) quelques minces fentes verticales aux angles des culs-de-lampe et en quelques autres points.

9. Culées. — Elles n'ont pas de plinthe : on ne la regrette pas.

Leurs culs-de-lampe sont un peu lourds.

10. Aspect du pont (S_3). — Pas d'arêtes vives : on a, par exemple, arrondi en rayon de 10cm les arêtes d'intrados et d'extrados de la voûte.

Tout le pont est enduit du même badigeon blanc.

Il est moulé, et le paraît.

11. Béton. — *A. - Pierre cassée.* — Les pierres calcaires pour le béton s'écrasaient de 560k à 840k; les plus dures étaient réservées à la voûte et cassées à part.

Le concasseur fournissait 4 à 5mc par heure, et donnait :

55 °/o de pierre de 15mm à 40mm de grosseur ;
25 °/o de gravier de 8mm à 15mm ;
20 °/o de sable rouge, dur, de 0 à 8mm.

B. - Dosages.

	1 vol. Ciment de Blaubeuren, qualité « Brückencement »				
	Sable		Pierre cassée		*Consistance du béton*
	Dosage en vol.	Provenance	Dosage en vol.	Nature de la pierre	
Voûte	3v	Danube	5v	Pierre et gravier calcaires, durs	*Terre humide*
Près des rotules	1v	Danube	2v5	Porphyre lavé de Dossenheim (Bade)	*Terre humide*
Béton armé	4v5	Gravier broyé	»	»	*Fluide épais*

C. - **Essais,** *faits à l'Ecole Polytechnique de Stuttgart, pendant la construction, sur du béton pris à la bétonnière.*

	Composition du béton Ciment Portland : 1^v — Sable	Pierre cassée	Mode de fabrication	*Age en jours*	Densité	Résistance à l'écrasement en Kg 0^m01^2
Culées	2^v25 Pfuhl	6^v75 Calcaire tendre	Machine	*64*	2 25	200^k
	2^v25 Pfühl	6^v75 Gravier du Danube, cassé	—	*66*	2 41	277^k
	2^v25 Danube	7^v75 Calcaire tendre	—	*81*	2 37	264^k
Voûte	3^v Danube	5^v Calcaire dur	—	*57*	2 42	346^k
Près des articulations (f_{19}, f_{20})	1^v Danube	2^v5 Gravier porphyrique en 5 grosseurs de 3 à 35^{mm}, lavé	—	*11*	2 30	410^k
				63	2 31	475^k
Clavage derrière les rotules (f_{19}, f_{20})	0^v5 Danube (lavé)	1^v5 Gravier porphyrique, jusqu'à 8^{mm}	Main	*37*	2 22	373^k

D. - Mortier des parements. — Tous les parements en élévation sont en un mortier, jouant la pierre, dont voici la composition :

Portland	1^v
Sable rouge dur	1^v5
Sable blanc tendre (pour avoir un ton clair)	2^v

Il était appliqué plastique.

12. Cintre (f_{12} à f_{17}). — Le sable des boîtes (quartz à grains fins) était grillé : pour le maintenir sec, on remplissait de goudron l'intervalle entre le piston et la boîte. Une toile à voile entourait le tout.

Dans le calcul, on admettait un effort de 60^k suivant le sens des fibres, de 20^k normalement aux fibres.

Pour tenir compte des trépidations pendant le pilonnage, on a majoré de 50 % le poids de la voûte.

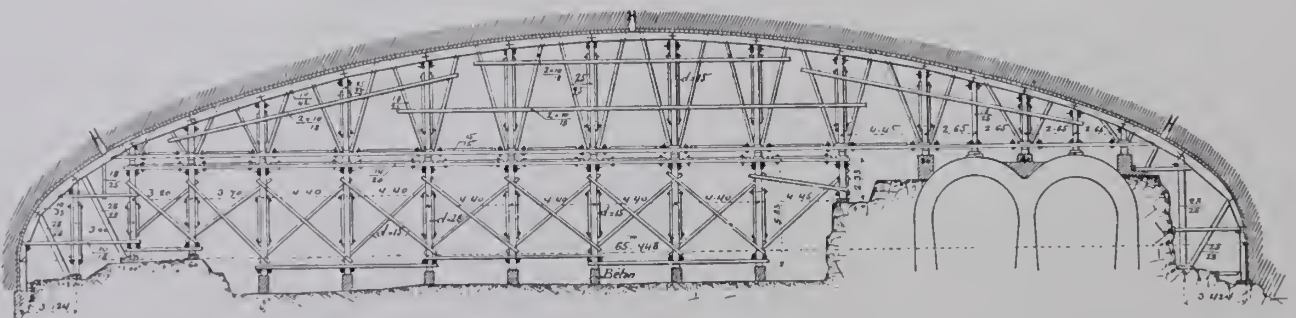
13. Fondations. — On a noyé les redans taillés dans le rocher avec du béton à 1^v de ciment pour 12^v de sable et pierre cassée ; puis on a posé le béton du corps des culées, en le pilonnant par couches en forme de coin de 20^{cm} à 25^{cm} d'épaisseur : on a noyé dans le bas 1/5 de pierres (f_2).

Le béton était presque plastique.

On en posait chaque jour de 55^{mc} à 90^{mc}.

Cintre

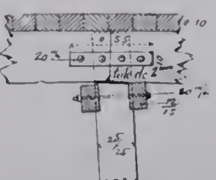
f_{12} — Élévation — 2^{mm}5



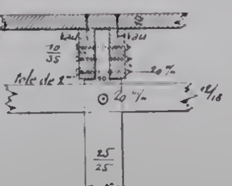
Détails — 2^{cm}

Platelage et vaux

f_{13} — Vue de face

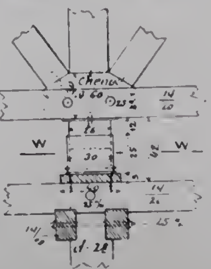


f_{14} — Vue de coté

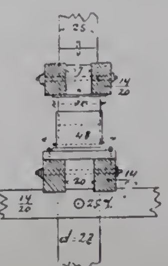


Appui des montants et contrefiches

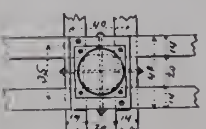
f_{15} — Vue de face



f_{16} — Vue de côté

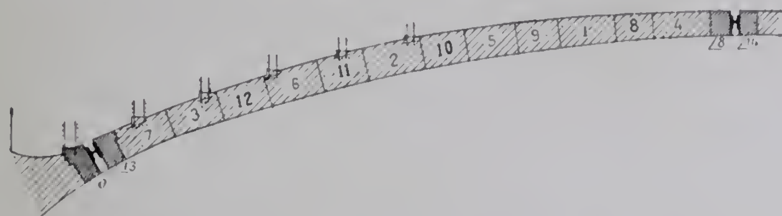


f_{17} — Coupe sur *ww* de f_{15}



14. Exécution de la grande voûte (f_{18}). — Chaque demi-voûte était divisée en 14 tranches alternées, les unes plus épaisses, ayant leur axe au-dessus des montants du cintre, les autres un peu plus minces.

f_{18} — Ordre d'exécution des tranches — 3mm



En un jour, on pouvait poser une tranche et sa symétrique (55mc à 75mc).

On bétonna d'abord les tranches épaisses, puis leurs intervalles. On maintint ouverte une des tranches voisines de l'articulation de clef, pendant 8 jours après l'achèvement du reste.

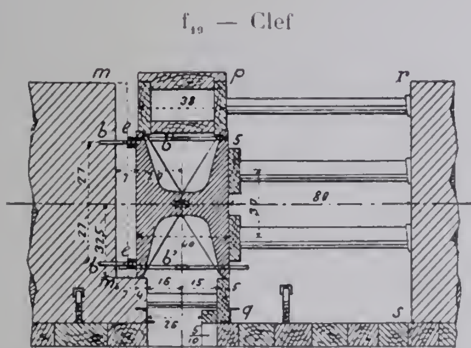
Pour le mortier de parement à 1 : 3,5, on avait disposé, à 8cm en arrière des cloisons de tête, d'autres cloisons en tôle de 40cm de hauteur ; on y pilonnait le mortier en même temps que le béton du corps de la voûte ; puis on enlevait de suite les tôles.

Ce mortier devait être posé presque plastique, bien pilonné et soigneusement arrosé après l'enlèvement des cloisons.

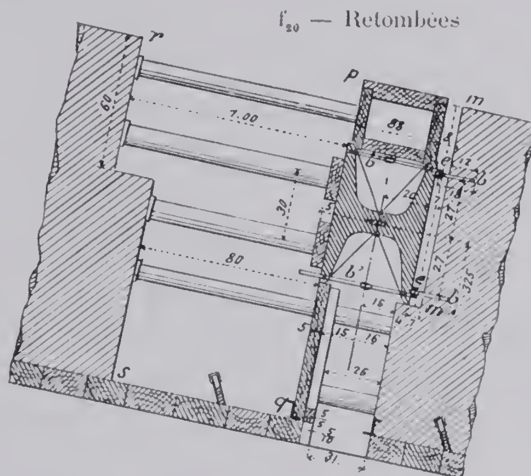
15. Pose des rotules. — On avait arrêté le béton des tranches 0 et 8 (f_{18}), à 7cm des rotules (f_{19}, f_{20}) : on y avait fixé des boulons *b* (4 par rotule), portant

Pose des rotules — 30mm

f_{19} — Clef



f_{20} — Retombées



des écrous *e*, vissés de façon à se trouver exactement dans le plan d'appui des rotules.

Pour mettre celles-ci en place, on solidarisait leurs sommiers par 4 boulons *b'*, qu'on sciera plus tard, avant le décintrement.

On appuyait le bloc ainsi formé contre les 4 écrous *ee*, après avoir bétonné l'intervalle *pqrs* (tranches 13 et 14 de f_{18}). On pilonnait, dans l'intervalle de 7cm resté vide *mm*, du mortier à 1v de Portland et 2v de sable porphyrique.

A l'extrados, l'intervalle au-dessus des rotules est recouvert par des dalles de béton D (f_7, f_{10}, f_{11}) à joints remplis de goudron.

Les 39 rotules furent posées en une semaine par 3 hommes.

On construisit la voûte en 15 jours (770^{mc} de béton, 28^{T}5 d'acier des rotules).

16. Décintrement. — A la clef, la chaleur avait un peu détaché la voûte du platelage.

On plaça deux hommes à chacune des 104 boîtes.

On a d'abord abaissé le sable de 3^{mm} dans toutes les boîtes, puis de 5^{mm} au cerveau seulement, puis encore de 3^{mm} à toutes les boîtes ; enfin, on abaissa complètement les pistons des reins.

17. Mouvements dûs à la température (observations faites à la clef, sur le trottoir Est).

Date de l'observation	Température en °C.	Niveau de la clef au-dessous de la cote prise avant décintrement
4 août 1905	+ 27°	4^{mm}5
4 janvier 1906	− 12°	53^{mm}

La clef a donc baissé de 48^{mm}5 pour un abaissement de température de 39°.[2]

18. Dates.

Commencement des travaux .... fin de l'automne 1904
Commencement du bétonnage de la voûte ...... 29 avril 1905
Ouverture à la circulation .... milieu d'octobre 1905

19. Personnel. — Le pont a été construit par les Chemins de fer de l'État de Wurtemberg.

Projet, Calculs, Direction des Travaux :

Direction Générale : M. Neuffer, « Ober-Baurat » à Stuttgart.

Direction locale : M. Lupfer « Eisenbahnbauinspektor » ; — M. Barth « Regierungs-Bauführer ».

Architecture : M. Bonatz, Architecte, de l'Ecole Polytechnique de Stuttgart.

Entrepreneurs : MM. A. Kunz et Cie, de Kempten.

2. — La formule : $\delta b \begin{pmatrix}\text{tassement dû à une}\\ \text{variation}\\ \text{de température } \tau_0\end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix}\text{coefficient}\\ \text{de dilatation}\\ \text{du béton}\end{pmatrix} \tau_0 \left[b \text{ (montée)} + \frac{[a \text{ (demi-portée)}]^2}{b} \right]$

donne pour : $\alpha = 8,8 \times 10^{-6}$, $\tau_0 = 39°$, $b = 5^m80$, $2a = 57^m$: $\delta b = 50^{mm}$ (S_2).

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution gracieusement communiqués par M. Neuffer, en juin 1909.

S_2. — Deutsche Bauzeitung (Mitteilungen über Zement, Beton und Eisenbetonbau), 1907, 9 janvier, p. 1 à 4 ; — 23 janvier, p. 7 et 8 ; — 6 février, p. 11 et 12 : « *Die Wallstrassenbrücke* « *in Ulm a. D.* », Ober-Baurat Neuffer in Stuttgart.

S_3. — Ce que j'ai vu — août 1908.

Ce qui n'est pas spécifié S_3 est de S_2.
Les dessins sont réduits de S_1.

PONT ÉLISE, SUR LE BRAS DROIT DU DANUBE, A NEUBOURG[1] (BAVIÈRE

Route de Neubourg à Ingolstadt

1906-1907 $\overline{\mathbf{A}}^{1}$ 1re ($\geqslant 40^{m}$)$\cdot$4

Φ_1 (S_3)

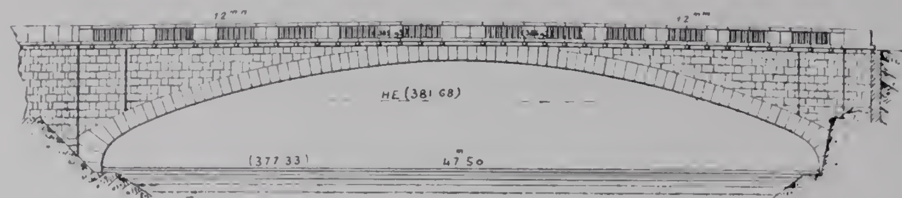


1. Dates (S''_1).

Commencement des travaux........................	7 novembre 1906
Fondations..	14 décembre 1906 - 18 avril 1907
Grande voûte......................................	12-20 septembre 1907
Décintrement......................................	31 octobre 1907
Ouverture à la circulation........................	14 décembre 1907

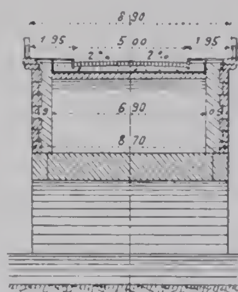
1. — Neuburg a. Donau.

f₁ — Élévation — 2^mm

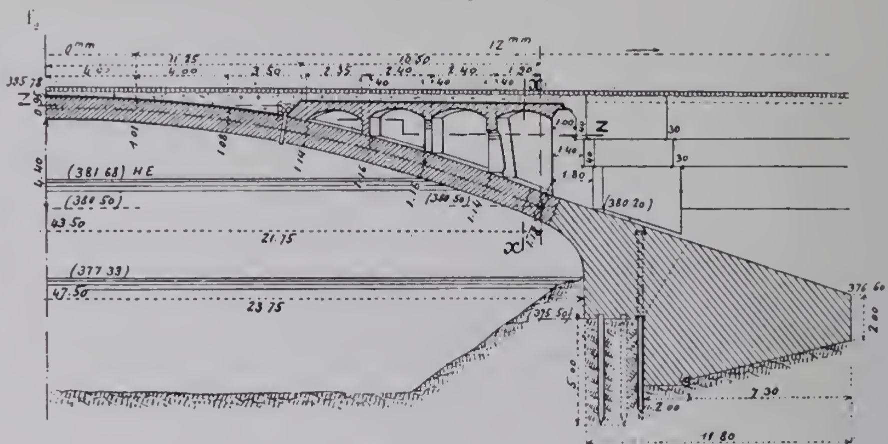


Coupes — 3^mm

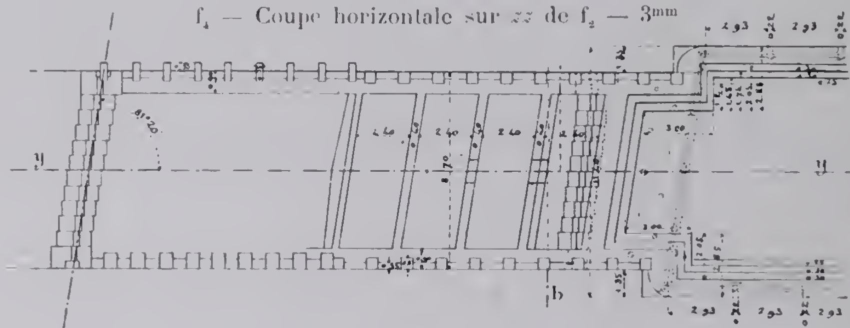
en travers sur xx de f₂ f₃



en long, sur yy de f₁ f₂

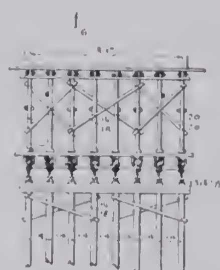


f₄ — Coupe horizontale sur zz de f₂ — 3^mm

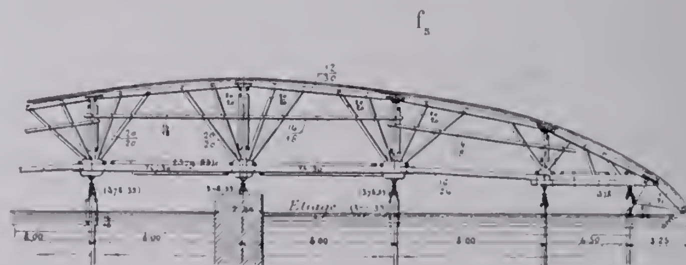


Cintre — 2^mm5

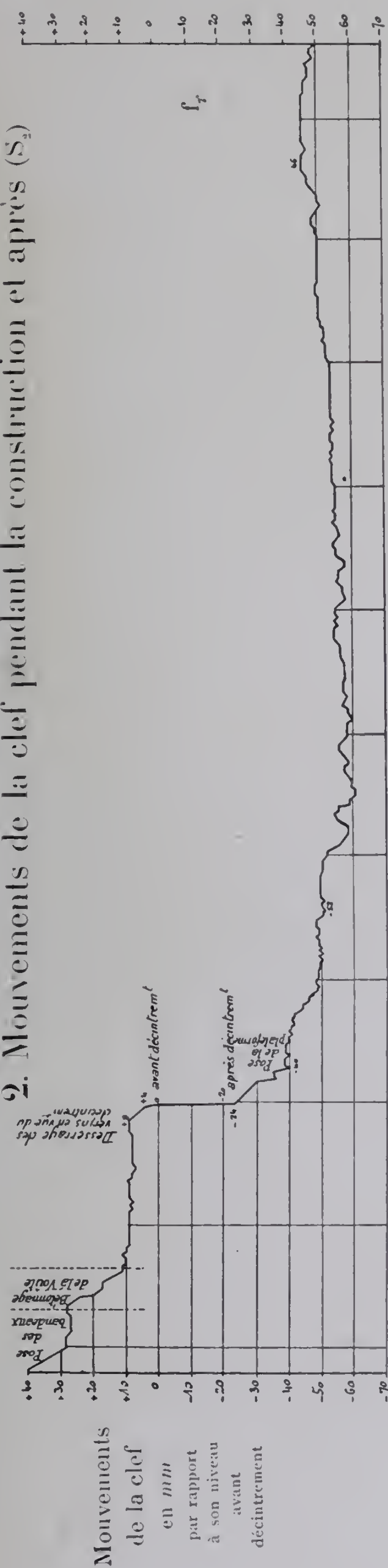
f₆

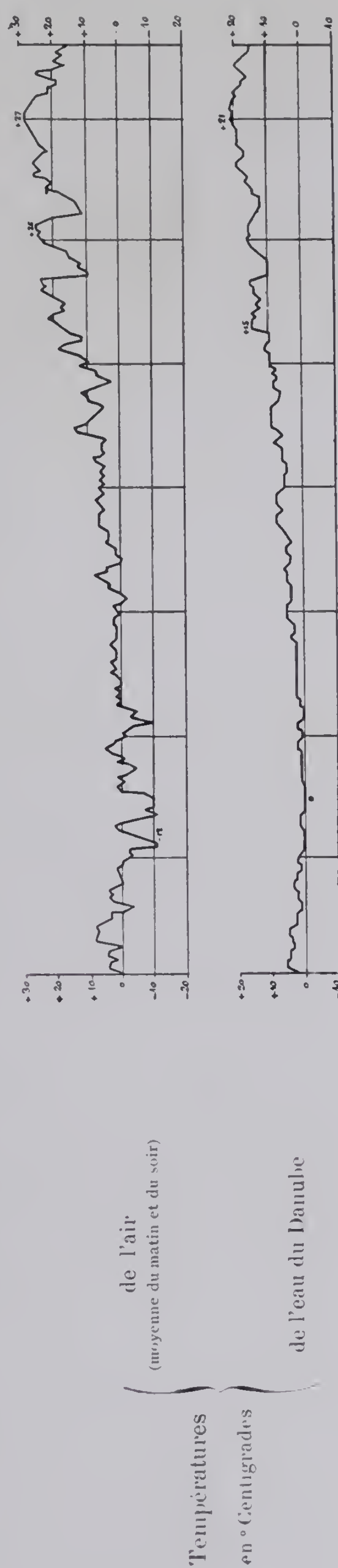


f₅



2. Mouvements de la clef pendant la construction et après (S_2)







3. Personnel (S''_1). — *Projet et Entreprise :* MM. Sager et Wœrner, de Munich.

Direction des Travaux : M. Egler, « K. Baurat » du « K. Strassen-und Flussbauamt » de Neubourg.

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution (S'_1) et renseignements (S''_1) qu'ont bien voulu me donner MM. Sager et Wœrner.

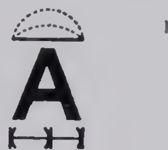
S_2. — Graphique que m'a gracieusement remis, à Munich, M. Probst, Ingénieur en Chef de l'Entreprise Sager et Wœrner.

S_3. — Ce que j'ai vu — août 1908.

VOÛTES ARTICULÉES

ARTICULATIONS ROULANTES[1]

ARCS TRÈS SURBAISSÉS[1]

 [1]

(Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

Série A[1] F^{r} $(\geqslant 40^{m})$[1]

1. — Pour le classement des voûtes articulées et le sens des symboles, voir Tome IV, Livre I, p. 28 et 29.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER

PONT Date Symbole	PROJET ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs *entre parapets* *entre tympans* *sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	GRANDE VOÛTE INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Joints de rupture* Retombées	ROTULES *Pour les dimensions, rayons, pressions,... voir Tome IV, Livre III.*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1 mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg $\overline{0^m01}^2$ Surcharges supposées	1° ÉVIDEMEN[S] DES TYMPAN[S] 2° *DÉCORAT[ION] DES TÊT[ES]*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
d' **Illerbeuren** *Barière* 1903-1904 A[1] F[r] (> 40m)[1]	*88m 80* RG 22mm5 RD 14m50	4m60 *1m00* Fruit : 1/20 0m55	Entre culées : Anse de panier à 7 centres Portée : **59m,00** Entre rotules : Arc d'anse de panier à 5 centres **57m,164** *9m 817* $\frac{1}{5,82} = 0,171$ *Rayons :* *à partir de la clef :* *RG* *m* *18,25* — *11,885* *RD* *m* *41,80* *53,85* *43,75* *au-dessous des rotules* *1,81* | *4,67*	1m,10 *RG* *1m 63* *RD* *1m 65* 1m 40	Acier moulé	B [1] damé Ciment......... 1v Sable.......... 2v5 Gravier cassé.. 5v fait à la machine 240k à 28 j. Sommiers d'articulations : B [1] moulé Ciment......... 1v Sable......... 1v5 Gravier cassé.. 1v5 Ciment Dyckerhoff et fils à Mannheim	Pression maxima dans la voûte, pour la position la plus défavorable de la surcharge : 31k Pas de tension Surcharge : 2 locomotives puis, des wagons Par mct : Locomotives 4400k Wagons 3500k	1° 10 voût[es] transver[sales] vues, en plein c[intre] de 2m3[…] sur piles 0m70,0m75,[…] travers[ées] par une v[oûte] longitud[inale] en ogi[ve] de 1m3[…] 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6.

A VOIE NORMALE **SÉRIE $\bar{A}^1$ Fr (⩾40m)** **TABLEAU SYNOPTIQUE**

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg $\overline{0^{m}01}^2$ *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Marne dure « Flinz » RG – 4m50 RD – 4m80 Pression maxima : 3k4 *Peu d'épuisements*	Fixe Montants et contrefiches *Sapin* Vérins soulagés pendant le bétonnage par des coins	5 *Etage supérieur* 20c *Etage inférieur* 26c 1m28 *60mm*	294mc » 24700f env.	0mc89 » 75f8	A pleine épaisseur, en 14 tranches de 4m de largeur	Voûtes d'évidement achevées *30 jours* 2 et 3 novembre	t_c = 15mm jusqu'au clavage t'_v = 9mm avant de desserrer les vérins des retombées Au décintrement, les rotules de retombées glissèrent de 10 et 18mm	Q = 2 404mc Q : S_p = 5mc88 Q : W = 0mc46 **D = 112 294f** D : S_p = 274f9 D : W = 21f7 D : Q = 46f7

ur le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES ARTICULÉES ARTICULATIONS ROULANTES
ARCS TRÈS SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\overline{A}^1$ F^r ($\geq$ 40m)

MONOGRAPHIES

PONT SUR L'ILLER, A ILLERBEUREN[1] *(ALLEMAGNE - Souabe bavaroise)*

Chemin de fer d'intérêt local[2] de Legau à Memmingen

1903-1904 $\overline{A}^1$ F^r ($\geq$ 40m)[1]

Φ_1 (S_3)



1. Le pont est en béton. — Tout est en béton,

soit coulé en place : grande et petites voûtes, culées, pilastres à refends horizontaux jouant la pierre de taille ;

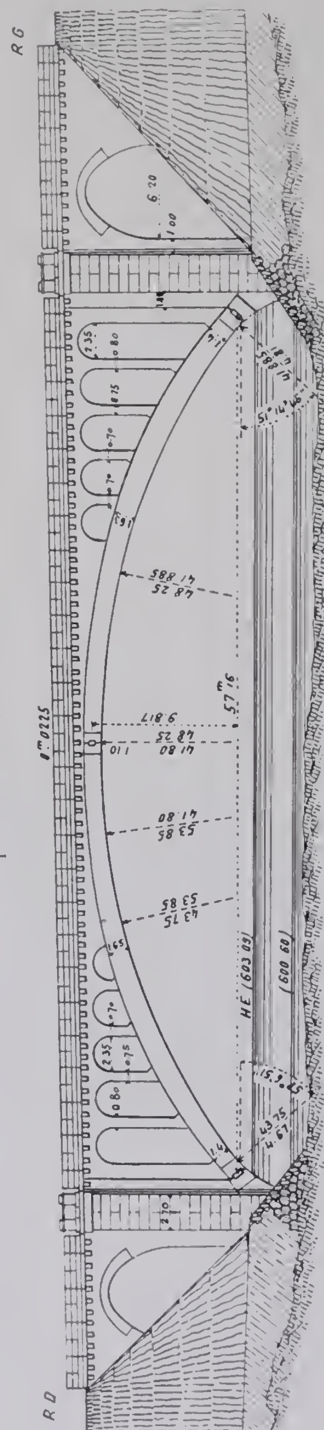
soit moulé à l'avance : sommiers des rotules, plinthes, consoles.

On l'a employé par économie[3] : on avait, tout près, de bon sable et de bon gravier.

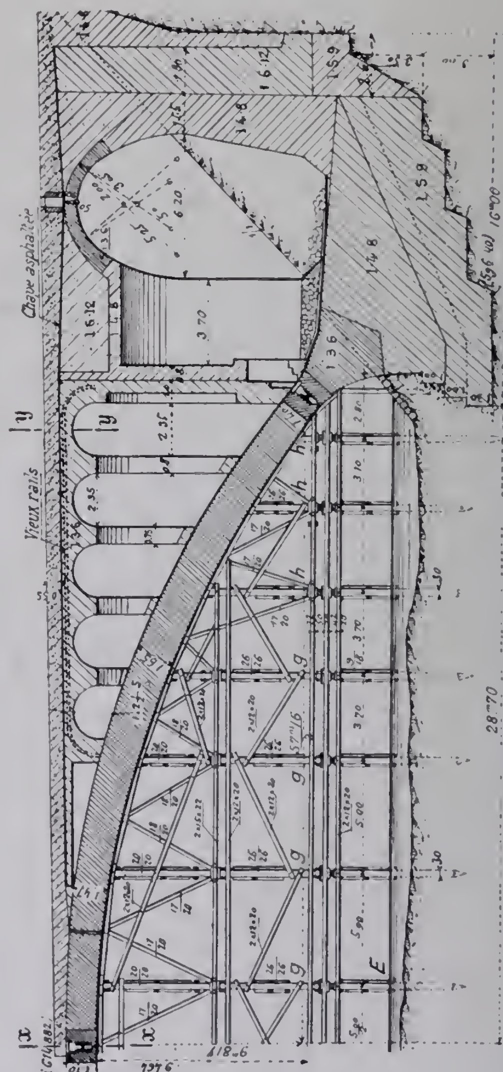
1. — Entre les stations de Lautrach et d'Illerbeuren, à 200m environ de celle-ci. Il semble plus naturel de l'appeler « Pont d'Illerbeuren » que « Pont de Lautrach ».

2. — A voie de 1m50.

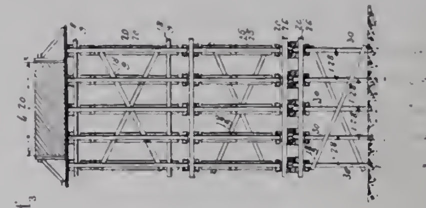
3. — L'ouvrage a coûté 112.294f ; en métal, il eût coûté 135.740f (S_1).

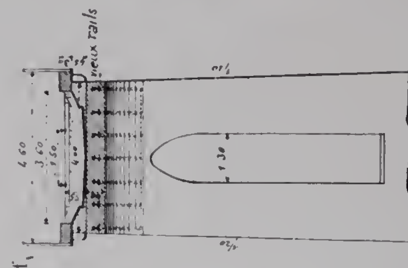


f_1 — Élévation — 2mm



f_2 — Demi-coupe en long et cintre — 3mm





Coupes en travers sur xx de f_2 — 3mm sur yy de f_2 — 5mm

2. Quelques observations. — On a tenu compte de la pente ($22^{mm}5$) dans les rayons d'intrados et l'épaisseur au joint de rupture de chaque demi-voûte.

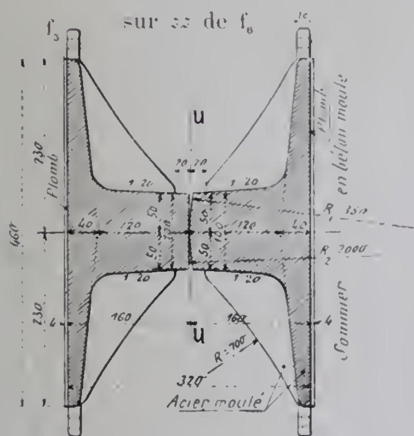
Les voûtes qui traversent les culées sont en ellipse surhaussée : leurs bandeaux n'ont été dessinés qu'au-dessus des reins.

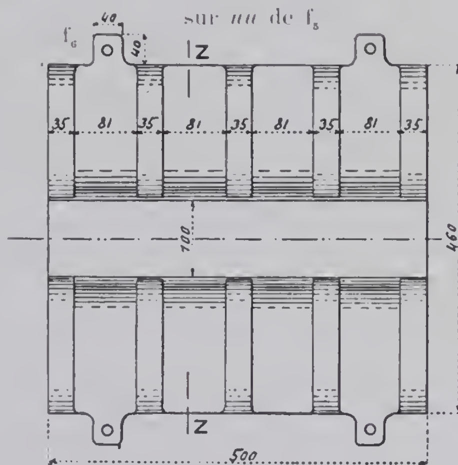
On a sagement montré les voûtes et leurs têtes telles qu'elles ont été moulées (S_3).

3. Articulations. — Elles sont cachées aux têtes et en douelle.

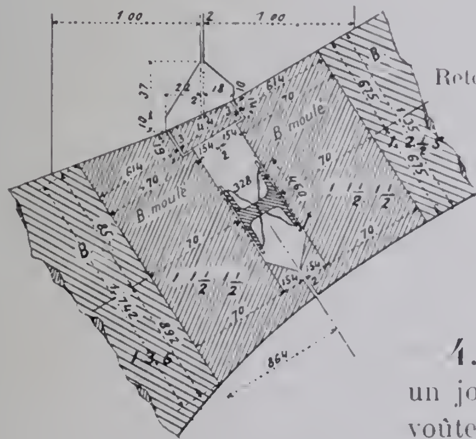
L'eau qui en tombe a tracé sur le sol une ligne de rouille (S_3).

Rotules
Coupes — 10^{cm}



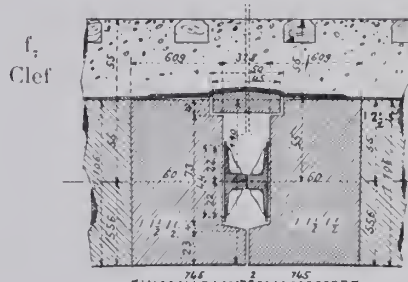


Rotules et sommiers — 2^{cm}



f_8 Retombées

f_7 Clef



4. Joints de dilatation. — On a ménagé un joint vide vertical dans la pile-culée de chaque voûte extrême d'élégissement (f_2).

Les voûtes d'élégissement sont armées, en long, de 7 vieux rails espacés de 0^m57, dont les abouts sont réunis par des fers ronds de 3^{cm} (f_2, f_4). Ils absorbent la poussée de la dernière voûte.

5. Chapes. — Le béton sous ballast est recouvert de feutre asphalté ; par-dessus, de sable.

L'extrados de la grande voûte sous les petites a été revêtu de ciment, puis d'asphalte (le soleil l'a fait couler).

A quelques places, l'eau a traversé la grande voûte et enlevé le mortier (S_3).



6. Composition et volume des bétons (voir f_2).

	Pour 1^{vol} de ciment			Cube
	Sable	Gravier cassé		
		Dosage	Grosseur maxima	
Grande voûte (résistance imposée à 28 jours : 240^{k})..	2^{v}5	5^{v}	3^{c}5	*387^{mc}*
Blocs de béton moulé : sommiers des articulations (résistance : 300^{k})........	1^{v}5	1^{v}5	3^{c}5	*33^{mc}*
Partie des culées sous les retombées ; voûtes de décharge et d'évidement........	3^{v}	6^{v}	3^{c}5	*376^{mc}*
Culées de la grande voûte et des voûtes de décharge.	4^{v}	8^{v}	3^{c}5	*948^{mc}*
Fondations........	5^{v}	9^{v}	4^{c}5	*476^{mc}*
Remplissage........	6^{v}	12^{v}		*128^{mc}*
Consoles, dalles, dés........	1^{v}5	3^{v}75	3^{c}5	*56^{mc}*

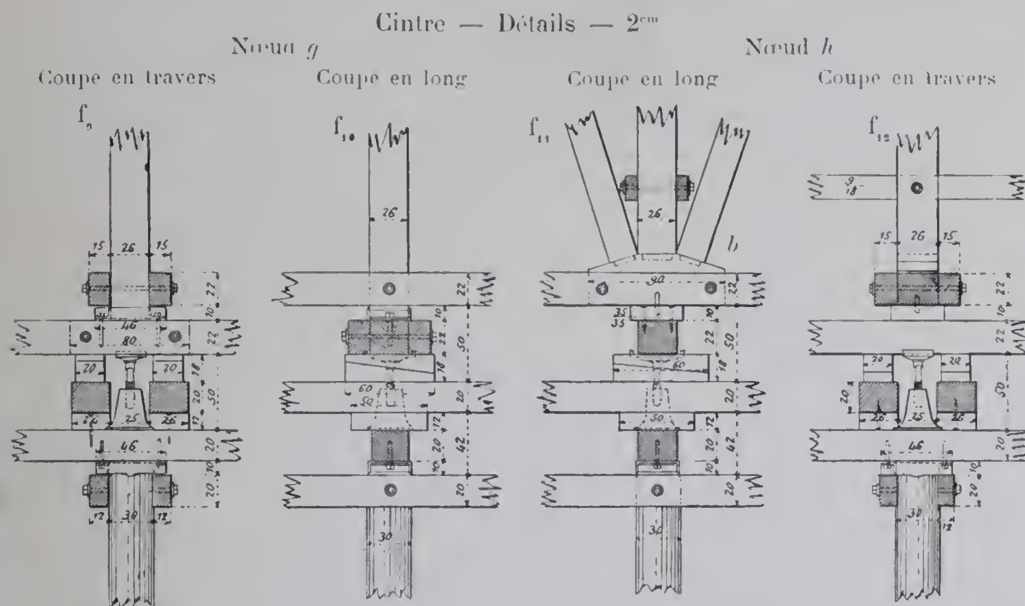
Tout le béton a été fait à la machine.

On a employé 430 tonnes de ciment.

Le sable et le gravier, très argileux, étaient soigneusement lavés.

7. Cintre (f_2, f_3). — Les pieux étaient battus de 40ᶜᵐ à 60ᶜᵐ dans des trous percés dans l'argile dure, au refus de 2ᵐᵐ d'un mouton de 680ᵏ tombant de 1ᵐ80.

Aux nœuds *h* (f_2, f_{11}, f_{12}), les pièces s'appuyaient sur une semelle en bois dur *b*.



Aux nœuds *g* (f_2, f_9, f_{10}), les montants étaient armés à leur pied d'un fer ⊔.

On admettait comme résistance du bois, normalement aux fibres :

10 à 12ᵏ pour le bois tendre (5 fois moins que dans le sens des fibres) ;

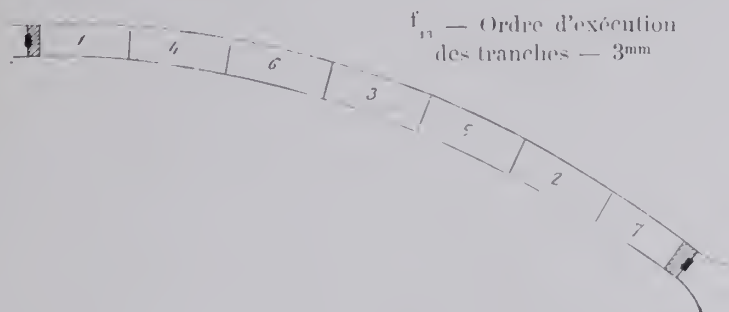
30ᵏ pour le bois dur.

Pour tenir compte des secousses pendant le pilonnage, on a majoré de 50 % le poids de la maçonnerie.

Les fermes reposaient sur des vérins à vis, soulagés pendant la construction par deux paires de coins (f_9 à f_{12}).

8. Fondations. — Avant la pose du béton, on enleva 1ᶜᵐ à 2ᶜᵐ de marne ramollie par les pluies.

9. Exécution de la grande voûte (S_4). — On l'a construite en 14 tranches symétriques de 4ᵐ de largeur, dans l'ordre des chiffres de f_{13}.



f_{13} — Ordre d'exécution des tranches — 3ᵐᵐ

10. Décintrement. — On enleva les coins, puis on abaissa les vérins à partir de la clef, sans toucher à ceux des naissances.

11. Dates.

Commencement des travaux	18 mai 1903
Construction du cintre	fin août - fin septembre
Pose des rotules	21 septembre
Bétonnage de la voûte	25 septembre - 3 octobre
Décintrement	2 - 3 novembre
Maçonneries sur les culées et la grande voûte	jusqu'à mi-décembre
Achèvement	avril 1904

12. Épreuves (15 avril 1904). — Sous la surcharge admise dans les calculs, le pont tassa, puis se releva de 4mm5.

13. Personnel.

Ingénieur. *Projet (1902) et Direction générale des Travaux :* M. Beutel, Ingénieur en chef de la Construction à la Direction Générale des Chemins de fer de l'État bavarois, à Munich (S_2).

Entrepreneurs : MM. B. Liebold et Cie, d'Holzminden.

L'Entreprise a obtenu de substituer des tympans évidés aux tympans pleins prévus.

SOURCES :

S_1. — Deutsche Bauzeitung, 1904 : 3 septembre, p. 441 à 443 ; - 10 septembre, p. 453 et 454 : « *Eisenbahnbrücke in Stampfbeton über die Iller bei Lautrach (Bayr.-Schwaben),* - Holzminden, 24 juillet 1904. L.

S_2. — Dessins de détail que m'a très aimablement remis, à Munich, M. l'Ingénieur en chef Beutel.

S_3. — Ce que j'ai vu — août 1908.

S_4. — Renseignements gracieusement communiqués par M. B. Liebold en juillet 1910.

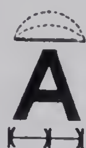
Texte : Ce qui n'est pas spécifié S_3 et S_4 est de S_1.
Dessins : Ils sont réduits de S_2 et rectifiés d'après S_4 pour les modifications en cours d'exécution.

Ce pont a été décrit dans le Génie Civil du 16 février 1907, p. 257 à 260, Pl. XVI : « *Ponts en béton à 3 rotules, sur l'Iller, à Lautrach et à Kempten (Barière)* » A, C.

VOÛTES ARTICULÉES

ARTICULATIONS ROULANTES [1]

ARCS TRÈS SURBAISSÉS

 [1]

(Suite)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES
SOUS ROUTE

Série A^n r^te (> 40^m) [1]

1. — Pour le classement des voûtes articulées et le sens des symboles, voir Tome IV, Livre I, p. 28 et 29.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	PROJET — ENSEMBLE *Longueur entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au dessus du sol ou de l'étiage	ENSEMBLE Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	GRANDES VOÛTES INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Joints de rupture* Retombées	ROTULES *Pour les dimensions, rayons, pressions,… voir Tome IV, Livre III.*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg / $\overline{0^m01}^2$ Surcharges supposées	1° ÉVIDEMEN[T] DES TYMPANS 2° *DÉCORATI[ON] DES TÊTE[S]*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Malling** *Lorraine allemande* 1899-1901 $\bar{A}^n$ r^{te} (≥ 40^m)[1] *3 voûtes de 40^m*	*138^m* » »	6^{m}00 *5^{m}72* Pas de fruit 0^{m}36	Arc d'anse de panier 40^m,00 *4^{m}67* $\frac{1}{8,56}$ = 0,116 Entre axes des rotules : 40^m,50 *4^{m}73* $\frac{1}{8,56}$ = 0,116	0^m,88 *Corps* *1^{m}31* *Têtes* *1^{m}10* 1^{m}00	Béton Ciment Portland 1^v Sable de la Moselle 2^v Quartz cassé fin 2^v	Béton (dans la voûte / près des rotules) Ciment 1^v / 1^v Sable 3^v / 3^v Pierre cassée 6^v / 4^{v}5		1° Pas d'évidem[ent] 2°
de **Hochberg** *Wurtemberg* 1901-1903 $\bar{A}^n$ r^{te} (≥ 40^m)[2] *2 voûtes de 39^{m}40*	*101^{m}32* *jusqu'aux abouts des culées* 50^{mm} 50^{mm} 13^{m}46	3^{m}82 *5^{m}10* Fruit : 1/10 0^{m}65	Entre axes des rotules : 40^m,00 *5^{m}40* $\frac{1}{7,407}$ = 0,135 Entre appuis : 39^m,40 *5^{m}40* $\frac{1}{7,296}$ = 0,137	0^m,75 *1^{m}01* 0^{m}75	Granit	Béton (dans la voûte / près des rotules) Ciment Portland 1^v / 1^v Sable du Mein et du Neckar 2^{v}5 / 2^v Muschelkalk cassé 5^v / 4^v	Pression maxima : Clef : 28^k Joints de rupture : 34^k Retombées : 28^k 400^k 1^{m2} et Rouleau à vapeur de 16^T	1° 2 étag[es] de v[oûtes] transvers[ales] de 1^m[…] sur pil[es] de 0^m[…] aveugle[s] à 30[…] en arr[ière] des tête[s] par un […] de 30[…] 2°
Cornélius à **Munich** *Bavière* 1902-1903 $\bar{A}^n$ r^{te} (≥ 40^m)[3] *1 voûte de 44^m en muschelkalk, et 2 voûtes de 38^{m}50 en béton, avec têtes en muschelkalk*	*177^m* Au-dessus de la voûte de 44^m : 30^{mm} 0 clef 6^{m}50	18^{m}00 *18^{m}50* Pas de fruit 0^{m}60	Arc avec raccord vertical aux retombées Portée entre appuis : 44^m,00 Entre axes des rotules : 41^m,00 *3^{m}42* $\frac{1}{12}$ = 0,834 *Rayon de courbure de la fibre moyenne à la clef : 55^m*	0^m,80 *1^{m}20* 0^{m}90	Rotules d'acier moulé prises dans des sabots en fonte, appuyés sur sommiers de granit	PT [1] Muschelkalk *Ciment — 700^k*	Pression maxima sous la surcharge : Clef : 36^k Joints de rupture : 24^k Retombées : 35^k 500^k 1^{m2} et Rouleau à vapeur de 23^T	1° Pas d'évidem[ent] Rempliss[age] en grav[ier] 2° »

(1) — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6.

SÉRIE $\underset{\leftrightarrow}{\overset{=}{A}}^{n}$ r^te^ (⩾ 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol kg 0m01² *Procédé* 10	EXÉCUTION — GRANDES VOÛTES — CINTRES — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement 11	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement* 12	Cube de bois, Poids de fer, Dépenses Totaux 13	par mq de douelle 2 14	MODE DE CONSTRUCTION 15	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date 16	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v 17	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité de surface utile S_p ³, de volume « utile » W ⁴ 18
Marne (Lias) et bancs de rocher *...puisements ...dans des ...tardeaux*	» » Vérins	6 *15cm* 1m25 »						
Rocher ...uschelkalk, fissuré ... rive gauche *...y a élargt ... massif ...fondation* *...isements dans des ...tardeaux*	Fixe Montants et contrefiches » Vérins à vis	5 *20cm* 1m48 *100mm*	Moyenne des deux cintres : 128mc 1500k 7928f	 0mc49 5k7 30f3	A pleine épaisseur par tranches de 1m de largeur	Tympans achevés *1 mois 1/2 environ* mi-novembre		Q = 2867mc Q : S_p = 4mc86 Q : W = 0mc46 Fondations / Élévation / Ensemble D : 18510f / 150548f / 169058f D : S_p : 31f4 / 255f3 / 286f7 D : W : 3f0 / 24f4 / 27f4 D : Q : » / » / 59f0
Marne ...Flinz ...6m60 ...Pression avec ...surcharge : ...x = 4k9 ...y = 3k7 *Fouille ...blindée*	Fixe Montants et contrefiches *Pin* Vérins à vis	10 *21cm* 2m00 *120mm*	575mc 4500k	0mc71 5k5		Tympans construits *28 jours* 8 mai	t_c = 45mm t'_v = 22mm	PT ¹ = 1915mc B ¹ = 9345mc Q = 11260mc Q : S_p = 4mc12 Q : W = 0mc59 Fondations / Élévation / Ensemble D : 290337f / 513770f / 804107f D : S_p : 106f1 / 187f8 / 293f9 D : W : 15f3 / 27f1 / 42f5 D : Q : » / » / 71f4

...r le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	PROJET ENSEMBLE *Longueur entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	GRANDES VOÛTES INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Joints de rupture* Retombées	ROTULES *Pour les dimensions, rayons, pressions,… voir Tome IV, Livre III.*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg/0m01² Surcharges supposées	1° ÉVIDEMEN[T] DES TYMPAN[S] 2° *DÉCORATI[ON] DES TÊTE[S]*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Reichenbach** à **Munich** *Barière* 1902-1903 A^n r^te (> 40m)4 *A partir de la rive gauche. 4 voûtes, de 11m, 28m, 27m, 26m, les 3 dernières articulées sur plomb*	*116m50* Au dessus de la grande voûte : 30mm / 20mm clef 7m50	20m00 *20m50* Pas de fruit »	Arc avec raccord vertical aux retombées Portée entre appuis : **44m00** Entre axes des rotules : **41m00** *4m 10* $\frac{1}{10}$ = 0,10 *Rayon de courbure de la fibre moyenne à la clef : 60m*	0m80 *1m20* 0m90	Rotules d'acier moulé prises dans des sabots en fonte, appuyés sur sommiers en granit	Bandeaux : PT [1] Muschelkalk de Franconie (500k à 800k) *Ciment — 0mc500* Corps : B [1] Ciment… 1v Sable…. 2v5 Gravier.. 5v	Pression maxima : Clef : 27k Joints de rupture : 25k Retombées : 26k	1° Entre tympan-p[…] voûtes d'a[…] en béto[n] sur pili[…] en béto[n] 2° »
de **Neckargartach** *Wurtemberg* 1903-1905 A^n r^te (> 40m)5 *5 voûtes de 40m*	*228m35* Dos d'ane Déclivité maxima : 11mm1 11m	10m80 *10m 40* Fruit : 1/40 0m48 au-dessus de la chape	Arc d'anse de panier **40m00** *Voûtes de rive* *4m 375* *Voûtes intermed.* *4m 825 à 5m 155* $\frac{1}{9,14}$ = 0,109 à $\frac{1}{7,75}$ = 0,129 *Rayons : Clef : 40m Retombées: 12m*	0m75 *1m00 environ* 0m80	Granit des Fichtel-gebirge	Béton Ciment Portland 1v de Lauffen Sable du Mein…. 1v, porphyrique 1v5 } 2v5 Porphyre Gravier…… 1v5, Pierre cassée 3v } 4v5 Près des articulations : 1v — 2v5 — 1v5 Pas de porphyre cassé	Pression maxima dans la voûte : 38k 400k/1m² et Rouleau à vapeur de 16T	1° 10 voûte[s] transversa[les] vues, en plein c[intre] sur p[…] de 60 […] percé[es] […] 5 ouvert[ures] de 1m30 2° »
Maximilien á **Munich** *Barière* 1903-1905 A^n r^te (> 40m)6 *2 voûtes de 45m87*	*123m24* 17mm5 RD / RG 11m	22m00 *21m80* Pas de fruit 0m50	Arc avec raccord vertical aux retombées Portée entre appuis : **45m87** Entre axes des rotules : **44m00** *4m 90 (moy.)* $\frac{1}{8,979}$ = 0,111 *Rayon de courbure de la fibre moyenne à la clef : 60m*	0m80 *1m09* 1m175	Rotules d'acier moulé prises dans des sabots en fonte, appuyés sur sommiers en granit	PT [1] Muschelkalk de Franconie (500k à 800k)	Pressions (MAX. / moy.) sans surcharge : Clef 28k / » Joints de rupt. 19k / » Retombées 25k / » avec surcharge : Clef 36k / 32k Joints de rupt. 36k / 24k Retombées 32k / 28k 500k/1m² et Rouleau à vapeur de 20T	1° 8 voût[es] transver[sales] vues, e[…] de 2m10 à 2[…] sur pi[…] de 0m90 per[…] de 8 voû[tes] longitudi[nales] en arc de […] espacé[es] de 0m8[…] Voûte[s] extrém[…] d'elégiss[ement] armées[…] Tout en [...] sauf les [...] 2° *Statue de P[…] au-dess[us] de la p[…]*

1 — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, page II, n° 6.

SÉRIE $\hat{A}^n$ r^te (⩾ 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE *(Suite)*

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0m01² *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDES VOÛTES — CINTRES — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité de surface utile S_p [3], de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	11	15	16	17	18
Marne dure « Flinz » *Résistance : 15k à 20k* – 7m20 – 5m80 Pression maxima : 5k5 *Épuisements dans des batardeaux en pilonné par couches de 10c à 15c*	Fixe Montants et contrefiches *Pin* Vérins à vis Coins aux retombées	**11** *25cm* 2m00 *100mm*	635mc 5200k	0mc70 5k8	A pleine épaisseur, par tranches de 1m20 à 1m50 entre cloisons normales à la fibre moyenne, bétonnées de 2 en 2 symétriquement, par couches de 10 à 15cm	Tympans construits Plate-forme commencée *15 jours* 12 mai	pendant le bétonnage: am^t 38mm, av^t 35mm après: am^t 10, av^t 12 t_c: 48, 47 t'_v: 21, 18 t''_v: 23, 24 Culée rive gauche ← 1mm3 ↓ 0mm5 Pile-culée rive droite → 2mm Elle se redressa ensuite	PT [1] = 1482mc B [1] = 11989mc Q = 13471mc Q : S_p = 4mc59 Q : W = 0mc66 Fondations / Élévation / Ensemble: D: 117421f / 698409f / 815830f D : S_p: 40f1 / 238f3 / 278f4 D : W: 5f8 / 34f2 / 40f0 D : Q: » / » / 60f6
Rocher Pression maxima 7k *Épuisements dans des batardeaux les fouilles blindées*	Voûte rive gauche : Retroussé sur 10m70 Passe marinière de 9m Autres voûtes : Fixe Montants et contrefiches » Vérins	**8** *20cm* 1m60 *Clef : 100mm* *Retombées : 10mm*			A pleine épaisseur en 32 tranches de 1m18	Piles des voûtes d'évidement achevées *28 jours* 10 novembre	t_c 80mm t'_v 13mm (moyenne)	Fondations / Élévation / Ensemble: PT [1]: » / 928mc / 928mc B [1]: 3000mc / 5720mc / 8720mc Q: 3000mc / 6648mc / 9648mc Q : S_p: 1mc21 / 2mc69 / 3mc90 Q : W: 0mc11 / 0mc25 / 0mc36 D: 98720f / 320840f / 419560f D : S_p: 40f0 / 130f1 / 170f1 D : W: 3f7 / 11f9 / 15f6 D : Q: 32f9 / 48f3 / 43f5
Marne dure « Flinz » – 5m Pression maxima : 5k5 *Épuisements fouilles blindées*	Fixe Montants et contrefiches *Pin* Vérins à vis	**12** *21cm* 2m00 *120mm*	750mc 6000k	0mc72 5k7		Tympans construits *50 jours* 13 juin	t'_v 20mm	PT [1] = 2790mc B [1] = 8354mc Q = 11144mc Q : S_p = 4mc11 Q : W = 0mc37 Fondations / Élévation / Ensemble: D: 214839f / 954993f / 1169832f D : S_p: 79f2 / 352f3 / 431f5 D : W: 7f2 / 31f8 / 39f0 D : Q: » / » / 105f0

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	PROJET ENSEMBLE *Longueur entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	GRANDES VOÛTES INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Joints de rupture* Retombées	ROTULES *Pour les dimensions, rayons, pressions,… voir Tome IV, Livre III.*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg / 0m01² Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENT DES TYMPANS 2° *DÉCORATI DES TÊT*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Wittelsbach** à **Munich** *Barière* 1904-1905 A^n r^le (≥ 40m)7 *A partir de la rive gauche : 4 voûtes de 11m, 28m, 27m, 26m, es ; dernières articulées sur plomb*	*152m* Au-dessus de la grande voûte : 25mm — clef — 20mm 8m	20m00 *20m30* Pas de fruit 0m37	Arc avec raccord vertical aux retombées Portée entre appuis : **44m,00** Entre axes des rotules : **41m,00** *4m,10* 1/10 = 0,10 *Rayon de courbure de la fibre moyenne à la clef : 60m*	**0m,80** *1m20* 0m90	Rotules d'acier moulé prises dans des sabots en fonte appuyés sur sommier de granit	Bandeaux : PT [1] Muschelkalk (500k à 800k) Corps : B [1] 1v — 2v5 — 5v	Pressions MAX. / moy. sans surcharge : Clef 25k » Joints de rupt. 17k » Retombées 25k » avec surcharge : Clef 29k 27k Joints de rupt. 25k 19k Retombées 28k 26k 500k 1m² et Rouleau à vapeur de 20T	1° Entr tympans pl voûtes en béton dé 1m en 1m50 en trav sur pil en béton de 50 2° *Statu equestr sur la p*
de **Moulins-lez-Metz** *Lorraine allemande* 1904-1905 A^n r^le (≥ 40m)8 *3 voûtes de 40m, 44m, 40m*	*158m50* 30mm 30mm 9m80	7m00 *7m10* Pas de fruit 0m45	Arcs d'anse de panier *Voûte centrale* Entre appuis : **44m,00** *5m68* 1/7,746 = 0,129 *Rayons : Clef : 44m60 Retombées : 44m* Entre axes des rotules : **44m,70** *5m59* 1/7,996 = 0,125 *Voûtes de rive* Entre appuis : **40m,00** *4m,78* 1/8,368 = 0,120 *Rayons : Clef : 18m Retombées : 18m* Entre axes des rotules : **40m,34** *4m,79* 1/8,463 = 0,118	**0m,95** *Corps : 1m42* *Têtes : 1m19* 1m15 **0m,90** *Corps : 1m,38* *Têtes : 1m12* 1m05	Béton moulé Ciment Portland de Dyckdorf 1v Sable de la Moselle 2v Dolomite cassée fine de Perl 2v	Bandeaux : MEV [1] Bossages Calcaire de Gravelotte et d'Amanvilliers *Ciment — 0mc333* Corps : B [1] Ciment..... 1v Sable...... 2v5 Gravier.... 5v Près des articulations : Ciment..... 1v Sable...... 2v Gravier.... 4v	Pressions MAX. / moy. *Voûte centrale :* sans surcharge : Clef 22k » Joints de rupt. 20k 19k Retombées 21k » avec surcharge : Clef 25k » Joints de rupt. 31k 15k Retombées 24k » *Voûtes de rive :* sans surcharge : Clef 21k » Joints de rupt. 20k 14k Retombées 21k » avec surcharge : Clef 24k » Joints de rupt. 32k 18k Retombées 24k » 400k 1m² et Rouleau à vapeur de 16T	1° 10 voû transvers vues en plein c de 1m5 en bét Ciment Sable Gravier les voûtes extrêmes seules sont arm Piles de 60 2°

1 — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, page II, nº 6.

SÉRIE $\overline{A}^n$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)

TABLEAU SYNOPTIQUE *(Suite)*

EXÉCUTION								CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER **Q** DÉPENSE **D**
FONDATIONS	GRANDES VOÛTES							
	CINTRES				MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT	TASSEMENTS DE LA CLEF	
	FERMES		Cube de bois Poids de fer Dépenses					
...ture du sol Profondeur ...us l'étiage Pressions sur le sol kg 0m01² *Procédé*	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Totaux	par mq de douelle [2]		État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	sur cintre t_c au décintrement t_v après t''_v	Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
...rne dure Flinz » — 5m ...ression ...xima : 4k1 *...issements ...fouilles ...ondées*	Fixe Montants et contrefiches *Pin* Vérins à vis	**11** *2.5cm* 2m00 *120mm*	625mc 5100k »	0mc70 5k71 »	A pleine épaisseur par tranches de 1m80 à 3m	Tympans exécutés *19 jours* 30 mai	t_c = 40mm entre le clavage et le décintrement t'_v = 31mm	PT [1] = 1522mc B [1] = 12685mc **Q = 14 207mc** Q : S_p = 4mc67 Q : W = 0mc66 D — Fondations 266001f ; Élévation 692410f ; Ensemble 958411f D : S_p — 87f5 ; 227f8 ; 315f3 D : W — 12f4 ; 32f2 ; 44f5 D : Q — » ; » ; 67f5
...ne dure ...s ...térieur) » ...ession ...xima : ...surcharge: 5k ...urcharge: 4k *...rdeaux ...étanches ...de la ...à voile*	» » » Vérins	*Voûte centrale :* **6** *1.5cm* 1m40 *100mm* *Voûte rive gauche :* *Surhaussement 80mm*	» » 32084f [6]	» » 97f7	A pleine épaisseur en 22 tranches symétriques	Tympans exécutés *Voûte centrale : 50 jours* 29 juillet	t_c = 50mm [6] t'_v = 7mm [6] t''_v = 0 [6] Les joints de dilatation se sont ouverts de 1mm aux retombées et fermés de 0mm5 à la clef Recul des culées : RG ← 0mm3 RD → 0mm1	**Q = 3970mc** Q : S_p = 5mc38 Q : W = 0mc55 **D = 252 106f** (sans les garde-corps) D : S_p = 227f1 D : W = 24f2 D : Q = 42f2

...e calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.
6. La source S'', ne spécifie pas à quelle voûte s'appliquent ces renseignements.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

PONT	PROJET							
	ENSEMBLE		GRANDES VOÛTES					
PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	*Longueur entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Joints de rupture* Retombées	ROTULES *Pour les dimensions, rayons, pressions,... voir Tome IV, Livre III.*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg $\overline{0^m01}^2$ Surcharges supposées	1° ÉVIDEMEN[T] DES TYMPAN[S] 2° *DÉCORATI[ON] DES TÊTE[S]*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Mannheim** *Grand-Duché de Bade* 1905-1908 $\overline{\text{A}}^n$ r^{te} ($\geqslant$ 40m) 9 *Un arc central en acier de 114m à 2 articulations* *2 voûtes de rive en béton, de 59m50*	*242m entre culées* Au-dessus des voûtes de rive : 27mm 14m35 du sommet de l'arc central au niveau moyen de l'eau	15m00 *15m36* Pas de fruit 0m25	Arc d'anse de panier Entre appuis : 59m,50 *5m 63* $\frac{1}{10,56} = 0,095$ *Rayons :* *Clef : 66m* *Retombées : 74m42* Entre axes des rotules : 58m,50 *5m 52* $\frac{1}{10,60} = 0,094$	1m,07 *1m,47* 1m12	Rotules en acier moulé appuyées sur sommiers de granit	Bandeaux : PT [1] Grès rouge du Palatinat, écaillé aux têtes, plat en douelle Corps : B [1] Ciment........ 1v Sable......... 4v Pierre cassée.. 3v (Porphyre)	Pressions sous la surcharge : Clef : MAX. 37k, moy. 27k Joints de rupture : MAX. 34k, moy. 31k Retombées : MAX. 35k, moy. 31k 400k 1m² et 2 rouleaux à vapeur de 25T	1° Entre tympans pl[eins] plate-for[me] en béton a[rmé] de 22[...] sur pilie[rs] en béton ar[mé] contrevent[és] par des cornie[res] 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6.

SÉRIE $\overset{\frown}{\underset{\leftrightarrow}{A}}{}^{n}$ r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)

TABLEAU SYNOPTIQUE *(Suite)*

	EXÉCUTION							CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q
FONDATIONS	GRANDES VOÛTES							DÉPENSE D
	CINTRES				MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT	TASSEMENTS DE LA CLEF	
	FERMES		Cube de bois Poids de fer Dépenses					
...ature du sol Profondeur ...ous l'étiage Pressions sur le sol ...1 kg $0^{m}01^{2}$ *Procédé*	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Totaux	par mq de douelle [2]		État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4].
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Gravier — oûte RG Pile — 5^{m} *...r comprimé* Culée *Pilotis et ...ton posé à sec* oûte RD Pile *Béton, ...artie à sec, partie ...immergé* Culée *Sable fin, argile, ...s gravier* » *Batardeau en fer*	» » » Vérins	13 *18cm* $1^{m}23$ *Voûte RG : 105mm RD : 120mm*			Par tranches	» » 25 octobre	$t_c = 4^{mm}$ t'_v RG 150^{mm} RD 224^{mm}	D = 1 925 040^{f} (Arc métallique et voûtes en béton)

... le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A* 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation 4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.

Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES ARTICULÉES ARTICULATIONS ROULANTES
ARCS TRÈS SURBAISSÉS

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE $\overline{A}^n$ r^{te} ($\geqslant$ 40m)

MONOGRAPHIES

PONT SUR LA MOSELLE, PRÈS DE MALLING[1]

(LORRAINE ALLEMANDE, - Cercle de Thionville)

Route de Fixem à Oberrentgen

1899-1901 $\overline{A}^n$ r^{te} ($\geqslant$ 40m) 1

Φ_1 — aval (S_2)



I. Aspect (S_2). — Il semble qu'il y ait un angle aux sommets des voûtes. Les clefs, en béton plus gras, sont plus foncées. On distingue les tranches de construction par leurs différentes teintes. Elles paraissent avoir été pilonnées parallèlement à la douelle.

1. — en allemand « *Mallingen* », - station du chemin de fer de Thionville à Trèves, à 12k5 de Thionville.

On voit, en douelle, les empreintes des planches du cintre.

Les becs des piles coupent durement les retombées des voûtes ; ils portent des pilastres en pierre de taille de grès.

Les tympans sont en moellons équarris à taille plate ; les joints de dilatation sont cachés.

La plinthe est en encorbellement sur consoles de grès rouge.

2. Personnel (S_1).

Projet et Direction des Travaux : Service de la Construction des Routes d'Alsace-Lorraine (Wegebauverwaltung in Elsass-Lothringen).

M. Blumhardt « Regierungs-und Baurat » à Strasbourg.

Entrepreneurs : MM. Windschild et Langelott, de Cossebaude, près de Dresde.

SOURCES :

S_1. — Renseignements gracieusement communiqués par M. Blumhardt, à Strasbourg.

S_2. — Ce que j'ai vu — août 1909.

PONT SUR LE NECKAR, A **HOCHBERG** *(WURTEMBERG)*

Route d'Ossweil à Hochberg

1901–1903 $\overline{A}^{n}$ r[te] (⩾ 40m)2

Φ. (S''')



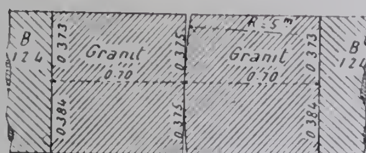
1. Rotules (S').

Goupes — 2cm5

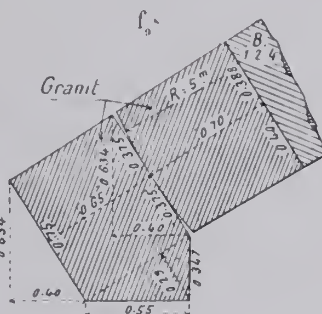
Retombées

sur la pile sur les culées

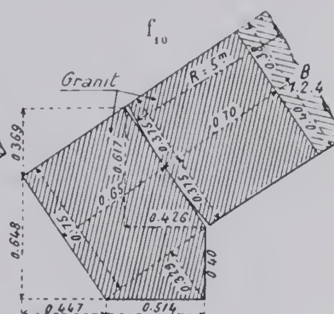
f8 — Clef



f9



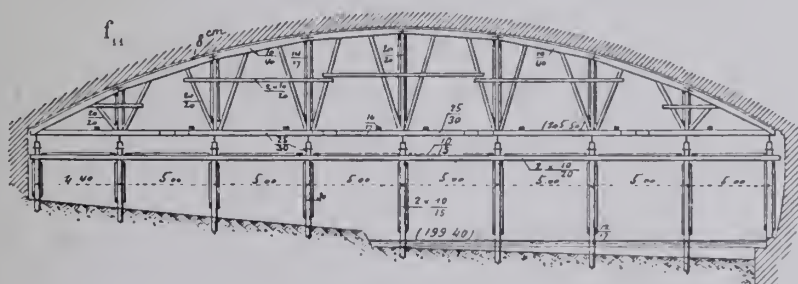
f10



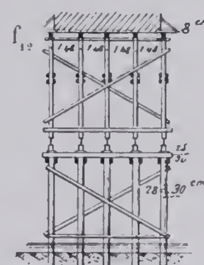
2. Cintres (S').

2mm5

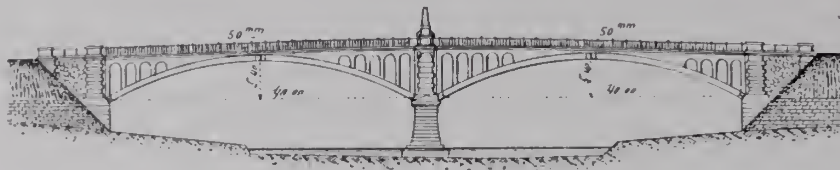
f11



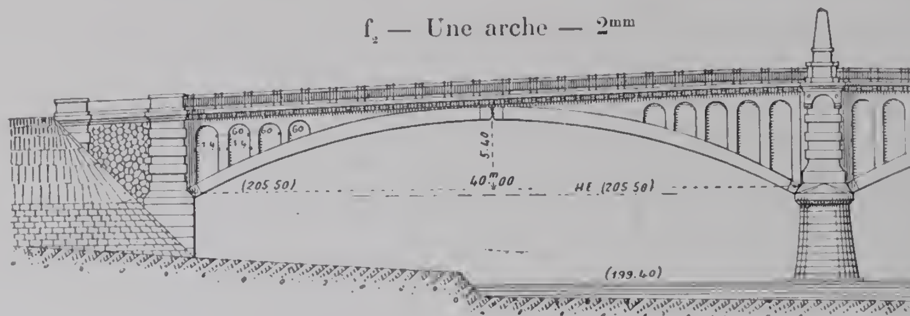
f12



f₁ — Ensemble — 1^mm^

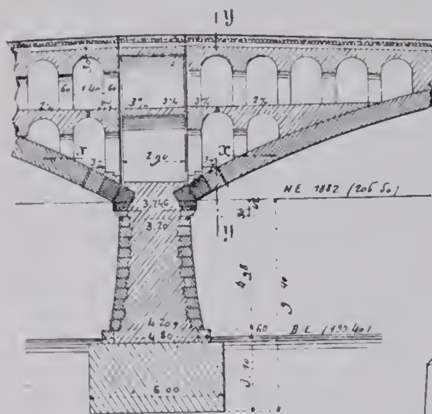


f₂ — Une arche — 2^mm^

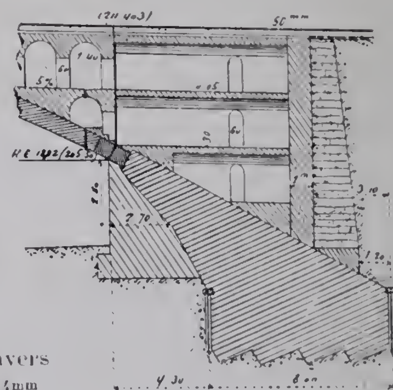


Coupes en long — 3^mm^

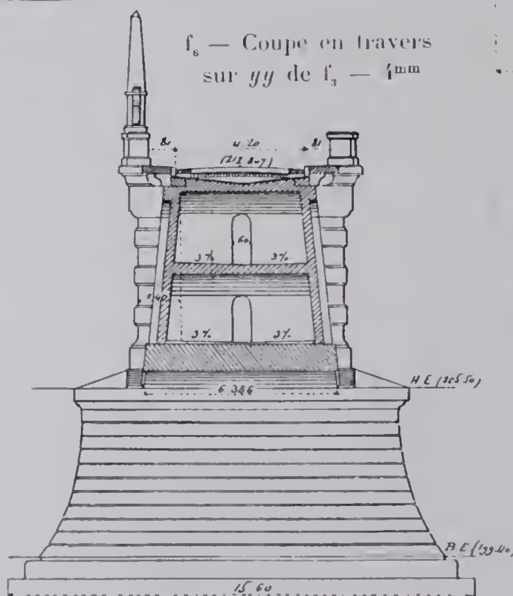
f₃ — Pile



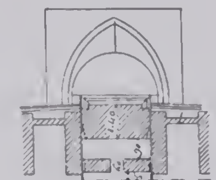
f₄ — Culée rive droite



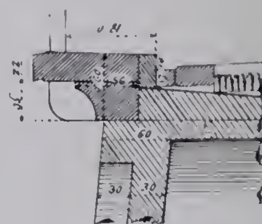
f₆ — Coupe en travers sur *yy* de f₃ — 4^mm^



f₅ — Demi-coupe horizontale sur *xx* de f₃ 3^mm^



f₇ — Couronnement 15^mm^



3. Dates (S''$_1$).

Commencement des travaux	octobre 1901
Piles et culées	15 nov. 1901 - juin 1902
Cintres et voûtes	fin juin - fin septembre
Décintrement	mi-novembre
Ouverture à la circulation	6 avril 1903

4. Personnel (S'$_1$).

Ingénieurs : *Projet et Direction des Travaux :* M. von Schaal, « Oberbaurat » ; M. Kübler, « Strassenbauinspektor ».

Entrepreneurs : MM. Sahlender et Heinze, de Gotha.

SOURCE :

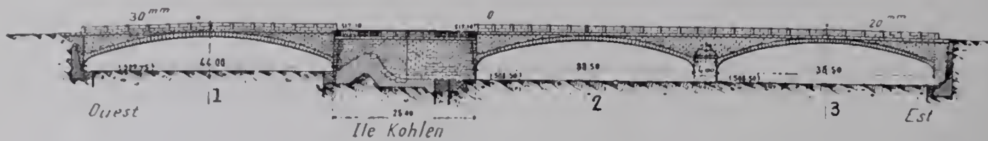
S$_1$. — Dessins d'exécution (S'$_1$), renseignements (S''$_1$), et photographie (S'''$_1$) qu'a bien voulu communiquer, sur la gracieuse intervention de M. le Dr Weyrauch, Professeur à l'Ecole Polytechnique de Stuttgart, M. Richard Leibbrand « Vorstand der Ministerialabtheilung für den Strassen-und Wasserbau » à Stuttgart.

PONT CORNÉLIUS, SUR L'ISAR, A MUNICH *(BAVIÈRE)*

entre la Corneliusstrasse et la Schweigerstrasse

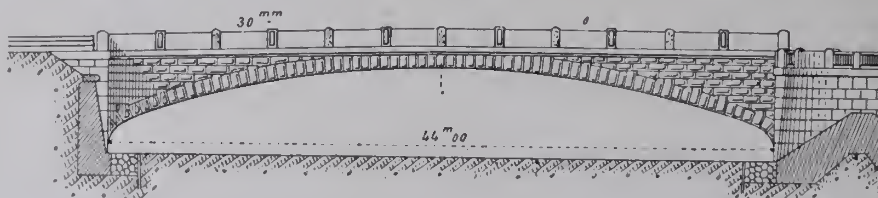
1902-1903 $\overline{\text{A}}$ⁿ r^te (⩾ 40m,3)

f_1 — Ensemble amont — 0mm75

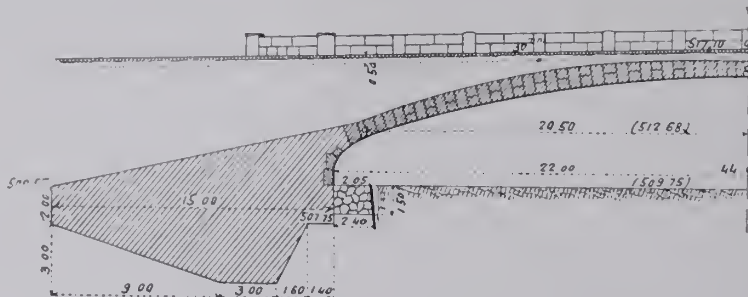


Voûte 1

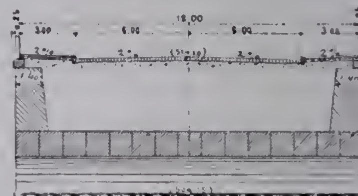
f_2 — Élévation — 2mm



f_3 — Demi-coupe en long — 2mm5

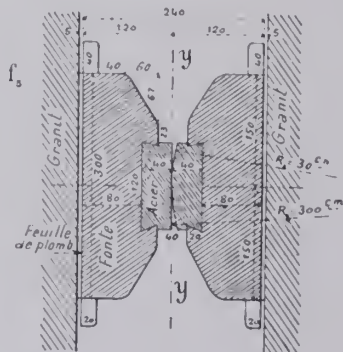


f_4 — Coupe en travers aux retombées — 2mm5

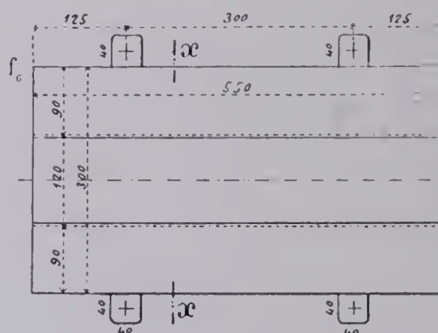


Rotules — 10cm

Coupe sur xx de f_6



Vue sur yy de f_5



1. Aspect. — Sur ces minces voûtes, les tympans en gros appareil sont un peu lourds.

Des figures sculptées du parapet, j'aime mieux ne rien dire.

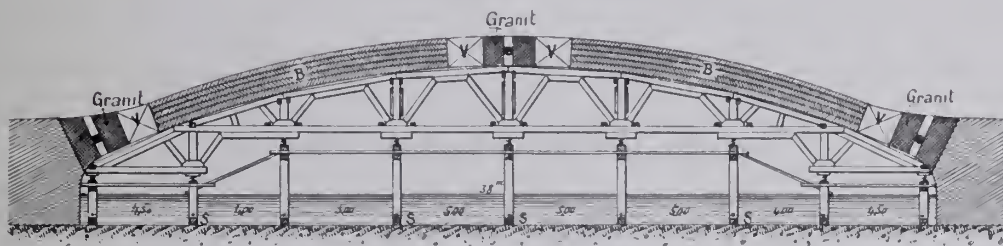
Φ_1 — Voûte 1 — amont (S_3)



2. Accident à la voûte 3 (f_1) (26 août 1902) (S_2).

A. - Description du cintre. — Les cintres des voûtes 2 et 3 étaient en pièces de sapin fort trouées, provenant de démolitions. Les palées portaient sur des semelles transversales *s* (f_7) en sapin de même provenance, posées sur une plate-forme en béton. Elles étaient très légèrement contreventées en long.

f_7 — Voûte 3 — Cintre et Mode d'exécution — 3^{mm} (S_2)



B. - Construction de la voûte. — On posait d'abord les sommiers des articulations et les bandeaux ; puis on pilonnait le béton, non, comme d'usage, par tranches isolées, mais par couches superposées[1] de 15^{cm} à 20^{cm}, ce qui trouble le béton dans sa prise. On avait ménagé des vides V (f_7) de 60^{cm} derrière les sommiers des articulations.

1. — « en peaux d'oignon » *(nach der Methode der Zwiebelschalen).*

C. - Accident. — Le 26 août 1902, le cintre, chargé des sommiers d'articulation, des bandeaux, et de 650^mc de béton posé dans les 30 dernières heures, s'écroula, tuant 2 hommes et en blessant 35.

Étaient intacts les vérins et les plates-formes en béton sous les semelles.

Ces semelles étaient écrasées. Quelques Ingénieurs y ont vu la cause de l'accident.

3. Personnel (S''$_1$).

Projet et Entreprise : MM. Sager et Wœrner, de Munich.

Direction des Travaux : M. Schwiening, Directeur des Travaux de la Ville

Architecture : M. le Professeur von Thiersch (S$_2$).

SOURCES :

S$_1$. — Dessins d'exécution (S'$_1$) et renseignements (S''$_1$), qu'ont bien voulu me remettre MM. Sager et Wœrner.

S$_2$. — Beton und Eisen, 5 Heft 1903, p. 305 à 311 : « *Die Corneliusbrücke und der* « *Einsturz eines Bogens derselben am 26 August 1902* » Dpl. Ing. W. Binswanger.

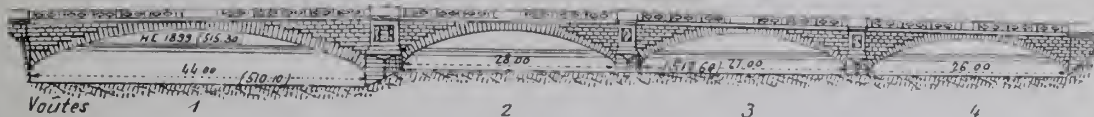
S$_3$. — Ce que j'ai vu — août 1908.

PONT DE REICHENBACH, SUR L'ISAR, A MUNICH *(BAVIÈRE)*

en prolongement de la Frauenhoferstrasse

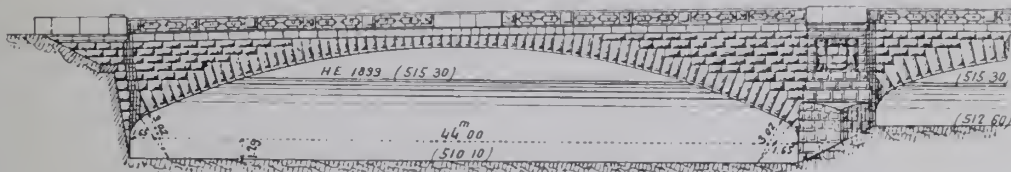
1902-1903 $\quad$ A^{n} p^{te} (≥ 40^{m}) 4

f_1 — Ensemble, amont — 1^{mm}

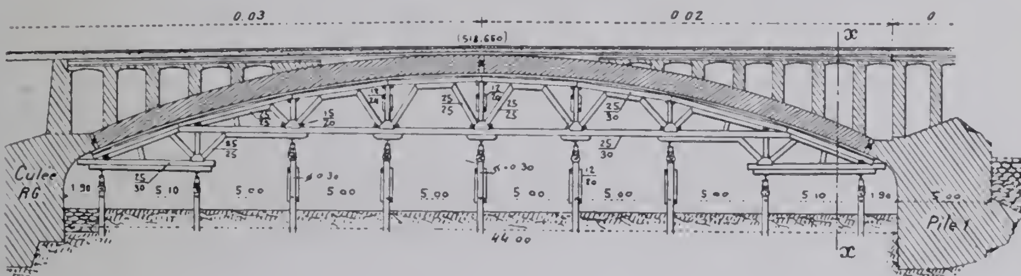


Voûte 1

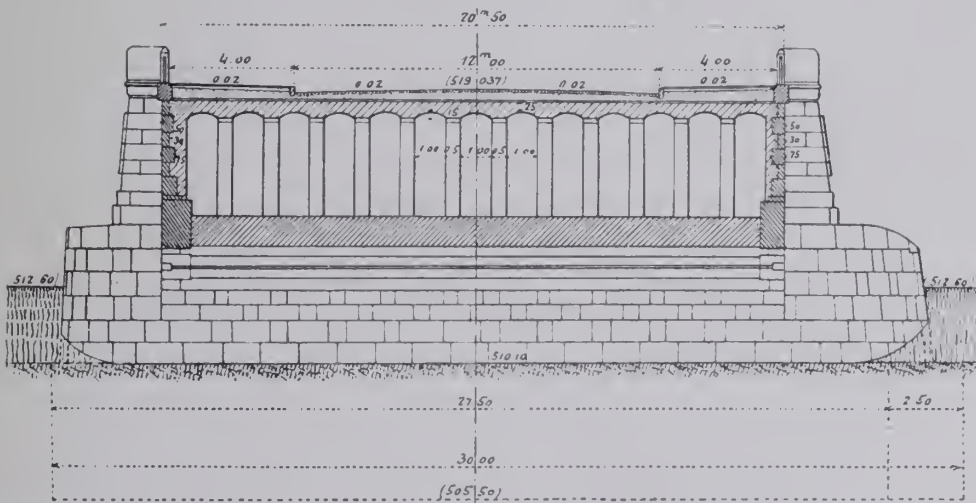
f_2 — Élévation amont — 2^{mm}



f_3 — Coupe en long et cintre — 2^{mm}5



f_4 — Coupe en travers sur xx de f_3 — 4^{mm}



1. Voûte 1 (f_1 à f_4).

A. - Tracé. — La fibre moyenne est la courbe de pression sous le poids propre.

Les épaisseurs de la voûte sont telles que la pression y est à peu près uniforme (25 à 30^k).

B. - Rotules. — Les mêmes qu'au pont Cornélius[1].

Φ_1 — Voûte 1 — amont (S_3)



2. Voûtes 2, 3, 4. — Leurs charnières sont de simples bandes de plomb de $200^{mm} \times 5^{mm}$ entre deux voussoirs de granit ; elles sont masquées aux têtes.

3. Tympans. — Les tympans en pierre de taille à gros bossages écrasent la voûte (Φ_1).

Entre eux, de minces piliers de béton soutiennent une plate-forme en béton chapée d'asphalte, qui porte la chaussée et les trottoirs (f_4).

4. Chaussée. Trottoirs. — La chaussée est pavée en granit avec joints bourrés d'asphalte. Les trottoirs sont en asphalte.

Sur la chaussée passent des voies de tramway ; sous les trottoirs, des tuyaux.

Les mâts de l'éclairage électrique, qui portent aussi les fils pour le tramway, sont à 0^m80 de la bordure des trottoirs.

1. — $\overline{A}^n$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)^3 — (f_5, f_6). Tome IV.

5. Exécution des voûtes. — On posa à sec, d'abord les sommiers, puis les voussoirs des bandeaux.

Ils sont plus épais aux reins que le corps en béton de la voûte : pendant qu'on les posait, on augmenta le surhaussement des fermes de tête en manœuvrant leurs vérins.

On construisit ensuite le corps en béton, par tranches isolées.

Après la prise du béton, on enlevait les cloisons ; on piquait grossièrement les lits pour augmenter l'adhérence avec le nouveau béton ; puis on les recouvrait d'une mince couche de mortier de ciment. On pilonnait ensuite dans le vide entre les tranches.

Pendant qu'on bétonnait une tranche, on matait au mortier à 1v 2v les voussoirs de ses bandeaux.

Les rotules avaient été posées en même temps que leurs sommiers. Mais on ne les fixa à leur place que lorsqu'on eut chargé le cintre du poids total des matériaux.

6. Dates de construction (1903) et tassements au décintrement.

Numéro des voûtes	Portée	Bétonnage		Décintrement	Nombre de jours sur cintre	Tassement au décintrement en *mm*.
		Commencement	Fin			
1 (R. G.)	44^m	23 mars	28 mars	12 mai	45^j	20^{mm} [2]
2	28	29 janvier	6 février	15 avril	68	12
3	27	8 janvier	12 janvier	14 mars	61	6
4 (R. D.)	26	7 janvier	»	14 mars	»	10

7. Mouvements pendant le décintrement de la voûte 4 (rive droite). — Quand on décintra la voûte 4 (rive droite), sa pile s'inclina de 1 à 2^{mm} vers l'arche 3, alors sur cintre. Elle se redressa, quand on décintra l'arche 3.

8. Personnel.

Projet et Entreprise : MM. Sager et Wœrner, de Munich.

Direction des Travaux : M. Schwiening, Directeur des Travaux de la Ville ;
M. H. Grüb, Ingénieur.

Architecture : M. le Professeur Fr. von Thiersch (S_1).

2. — Il correspond à peu près à un coefficient d'élasticité moyen : E (Kg $\overline{0^m01}^2$) = 2×10^5 (S_2)

SOURCES :

S_1. — Renseignements qu'ont bien voulu me communiquer MM. Sager et Wœrner

S_2. — Beton und Eisen, 1904, p. 9 à 17, Pl. II : « *Münchner Brückenbauten* » ; *II.* « *Die Reichenbachbrücke in München* », E. Burk.

S_3. — Ce que j'ai vu — août 1908.

Ce qui n'est pas spécifié S_1 ou S_3 est de S_2.

PONT SUR LE NECKAR, A NECKARGARTACH[1] *(WURTEMBERG)*

Route d'Heilbronn à Neckargartach

1903-1905 $\overline{\mathbf{A}}^{n}$ r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)5

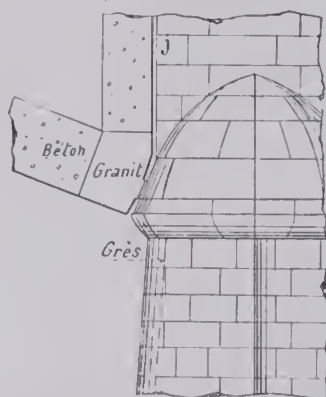
Φ_1 (S_1)



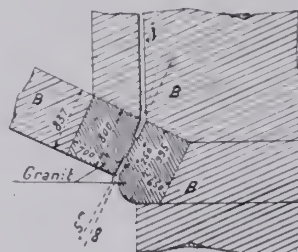
1. Articulations (f_8, f_9). — On a poli à la meule les surfaces de contact (S_2).

Articulation de retombée — 1^{cm}

f_8 — Élevation

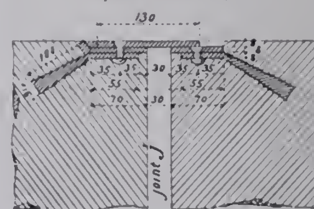


f_9 — Coupe



f_{10} — Comment est recouvert le joint de dilatation — 10^{cm}

Coupe en long du pont



2. Joints de dilatation (f_8 à f_{10}). — Des rotules de retombées aux parapets, des joints verticaux *j* coupent les tympans le long des pilastres.

Sur la plate-forme portant la chaussée et sur les trottoirs, ils sont recouverts par des plaques de tôle glissant l'une sur l'autre (f_{10}).

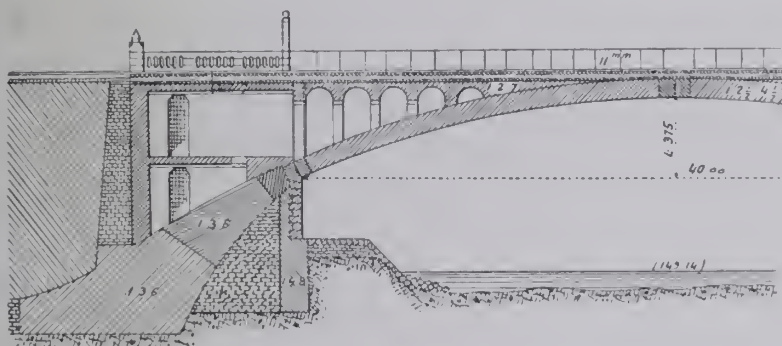
1. — à 3^{km} environ en aval d'Heilbronn (S_2).

f_1 — Ensemble, amont — 0mm5

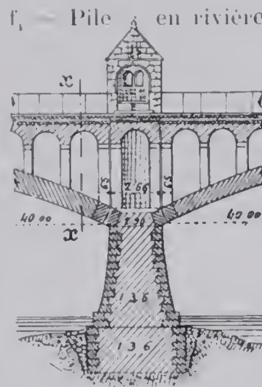
f_2 — Arche en rivière — 2mm

Coupes en long — 2mm5

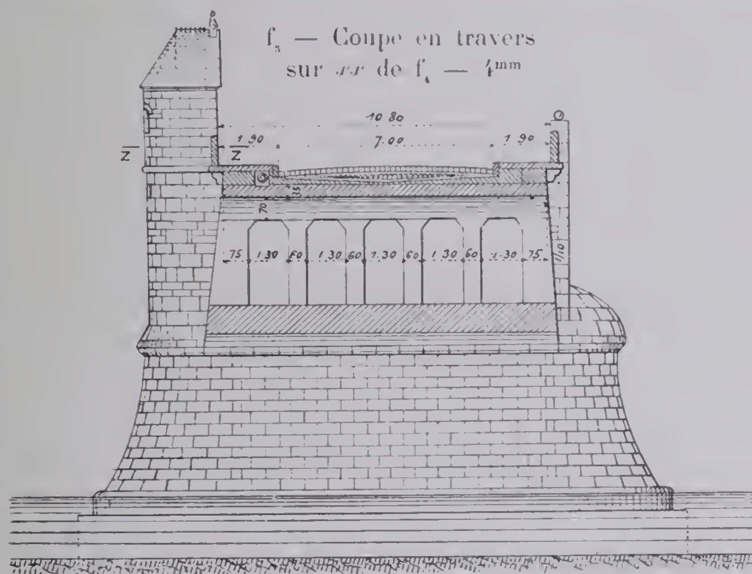
f_3 — Demi-voûte de rive gauche



f_4 — Pile 3 en rivière.

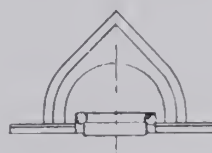


f_5 — Coupe en travers sur xx de f_4 — 4mm

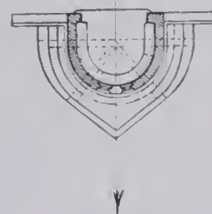


Becs — 4mm

f_6 — Plan par-dessus



f_7 - Coupe sur zz de f_5



Φ_2 (S_1)

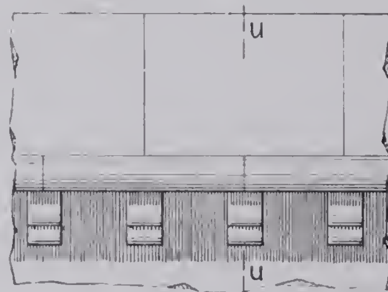


3. Chaussée et trottoirs (S_2). — Les pavés de granit de 17^{cm} reposent sur 6^{cm} de sable et gravier fin.

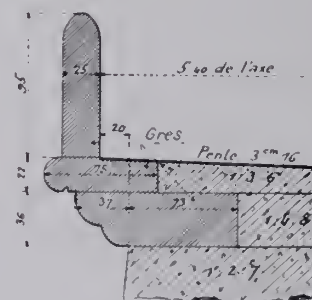
Les trottoirs sont en béton revêtu de ciment ; les bordures, en granit.

Couronnement — 2^{m}

f_{11} — Élevation



f_{12} — Coupe sur *uu* de f_{11}



4. Écoulement des eaux (S_2). — Sur le béton sous chaussée, en pente vers l'axe du pont, on a étalé successivement : un enduit lisse de ciment, - de l' « Anthrazin » chaud, - une couche de goudron chaud, - des feuilles de carton de toiture armé de jute, - une épaisse couche de goudron chaud.

Le tout[2] est recouvert de sable.

2. — « *Cette chape s'est jusqu'ici parfaitement comportée* » *(vorzüglich bewährt)* (S_2). Elle revient à 1f30 le m. q., sans l'enduit de ciment (S_2).

Un fer Zorès, dans l'axe du pont, conduit les eaux aux tuyaux traversant les reins des voûtes.

L'eau des rigoles s'écoule hors du pont par des gargouilles en grès (S_2) (Φ_1, f_2).

L'extrados des voûtes est recouvert de deux couches de « Siderosthen Lubrose ».

5. Matériaux (S_1, S_2, S_3).

A.-Composition du béton.

	Pour 1^{vol} de ciment Portland			Poids de ciment par mc. de béton
	Sable	Gravier — Quantité	Gravier — Grosseur	
Massifs de fondation et corps des piles et culées. — Trottoirs (sous le revêtement)........................	3^v	6^v		200^k
Voûtes [3] Résistance à 2 mois 1 2 : 400^k. On exigeait des matériaux tout-à-fait propres.	Sable du Mein 1^v Sable porphyrique (2 à 4^{mm}) 1^v5	Gravier porphyrique 1^v5 Porphyre cassé 3^v	8 à 12^{mm}	280^k
Près des articulations..........	id.	Gravier porphyrique 1^v5		
Tympans et plate-forme........	2^v	7^v	12 à 15^{mm}	250^k

B.-Maçonnerie (S_1). — Tous les massifs de fondation sont en béton : celui de la pile en rivière est parementé en moellons de calcaire.

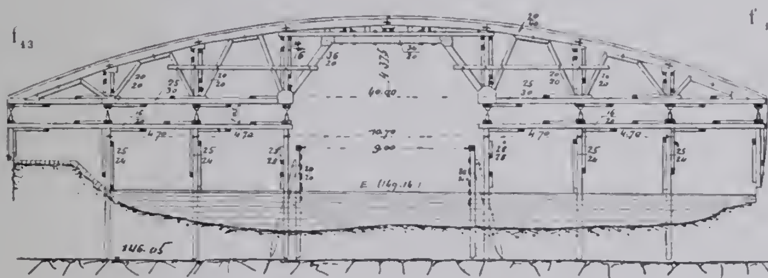
Les parements des piles et culées, les consoles, plinthes, parapets, niche, sont en grès d'Heilbronn.

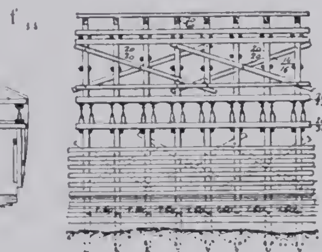
6. Cintres (f_{13} à f_{16}). — On n'a pas taillé d'assemblages.

Les abouts des pièces sont maintenus par des goujons de 8^{cm} de long, de 3^{cm} de diamètre.

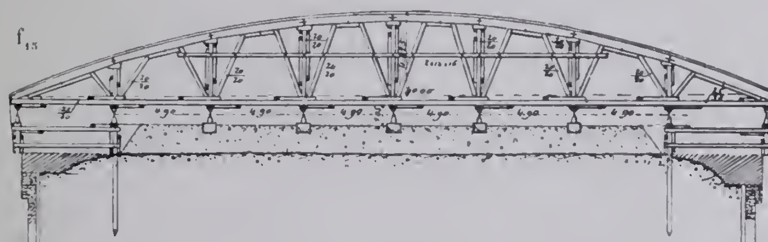
Cintres — $2^{mm}5$

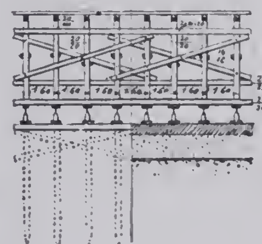
Arche rive gauche





Arche sur berge





3. — Dosage déterminé après essais à l'usine de Lauffen (S_2). Le béton de tête était plus fin, afin qu'on pût le travailler (S_2).

Les montants et contrefiches portent sur de forts ⊔ en fer, qui empêchent les déplacements latéraux et la pénétration dans les semelles.

On a ménagé sous le cintre de la voûte rive gauche une passe libre de 9^m : les chalands et radeaux y étaient guidés par un remorqueur à pétrole.

7. Fondations (S_2). — A la pile en rivière, on battit une enceinte étanche à 2^m50 de l'emplacement des maçonneries. On épuisa, et on creusa jusqu'au rocher, en laissant en haut une banquette de 1^m.

Les autres fouilles furent descendues de 6^m à 9^m sous le terrain naturel, d'abord sur 3^m en talus, puis par épuisement en fouilles blindées.

8. Exécution des voûtes (S_2). — *A. Construction par tranches.* Elles ont été faites toutes ensemble en 18 jours (S_1).

Le béton était pilonné par couches de 15^{cm} au plus et par tranches symétriques de 1^m18 d'épaisseur (32 par voûte). Chaque tranche, cubant 12 à 14^{mc}, était faite en 5 ou 6 heures.

On a occupé, en moyenne, 140 ouvriers par jour au bétonnage.

B. Pose des rotules. — Aux retombées, on posa d'abord le bloc inférieur. Entre ce bloc et la tranche inférieure de la voûte, on a ménagé la place du bloc supérieur avec un jeu de 12^{cm}.

On était assuré que les blocs étaient exactement en place, quand des règles graduées s'enfonçaient de la même quantité au-dessus ou au-dessous de la ligne de contact.

On bourrait de coton les joints d'articulation.

9. Construction des piles des voûtes d'évidement (S''_1). On l'a conduite de façon que la charge sur les voûtes fût aussi uniforme que possible (S''_1).

10. Décintrement (S_3). — On l'opéra en 3 fois, après qu'on eut construit les piles des voûtes d'évidement (S''_1).

Dates	Nombre de jours après l'achèvement des voûtes	Tassement en *mm* des clefs des voûtes n^os : 1 (R G)	2	3	4	5 (R D)	Observations
1904							
15 octobre	8j	4	4	5	4	4	On abaissa les cintres de quelques millimètres à la clef, - moins vers les retombées : les voûtes ne les quittèrent pas.
21 octobre	14j	2	1	2	2	2	
10 novembre	28j	7	6	1	5	7	On abaissa les cintres jusqu'au décollement complet.
	Totaux...	13	11	8	11	13	

On avait prévu un tassement de 24^{mm}.

Les vérins étaient manœuvrés par 80 hommes.

11. Dates (S''_1, S_2).

Fondations		10 août – 16 décembre 1903
Construction des cintres		mars 1904
Achèvement des voûtes		7 octobre
Piles et voûtes d'évidement		10 octobre – 10 novembre
Ouverture	aux piétons	15 juin 1905
	aux voitures	1er août

12. Personnel (S''_1, S_2).

Ingénieurs :

Projet et Direction des Travaux : M. von Schaal, « Oberbaurat », à Stuttgart.
Direction immédiate : M. Wegmann, « Regierungsbaumeister ».

Architecture, Décoration : M. le Professeur Theodor Fischer.
Sculpture : M. Jacob Brüllmann, de Stuttgart.

Entrepreneur : M. C. Baresel, de Stuttgart-Untertürkheim.

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution (S'_1) et renseignements (S''_1), que m'a gracieusement communiqués M. le « Baudirektor » Richard Leibbrand, « Vorstand der Strassen-und Wasserbauabteilung », du Ministère de l'Intérieur à Stuttgart.

S_2. — « Bauzeitung für Württemberg, Baden, Hessen, Elsass-Lothringen », 1906 : 1er septembre, p. 275 à 278 ; — 8 septembre, p. 283 à 286 : « *Die neue Strassenbrücke bei* « *Neckargartach* », nach einem Vortrag des Erbauers, Oberbaurats. v. Schaal, im Württembergischen Verein für Baukunde.

S_3. — « *Strassenbrücke über den Neckar bei Neckargartach* », Stuttgart, Strecker et Schröder, 1908.

Cette monographie m'a été gracieusement adressée par M. R. Leibbrand.

S_4. — Ce que j'ai vu — septembre 1908.

Les dessins sont réduits de S'_1, sauf f_3 qui est de S_2.

PONT MAXIMILIEN, SUR LE BRAS DROIT DE L'ISAR, A MUNICH *(BAVIÈRE)*

en prolongement de la Maximilianstrasse

1903-1905 A^n r^te (> 40^m)6

Φ₁ (S₁)



1. Aspect. — L'aspect d'un pont à deux arches est, d'ordinaire, fort ingrat : il est sauvé ici par la grande Pallas qui couronne et justifie la pile unique.

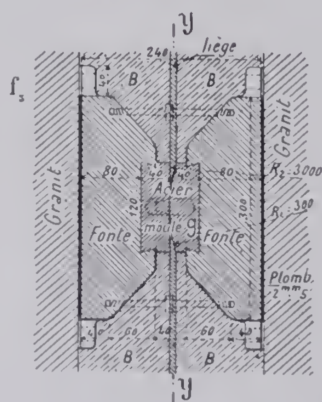
Sur ces légères voûtes, les piliers des petites arches sont peut-être un peu lourds, l'attique un peu trop plein.

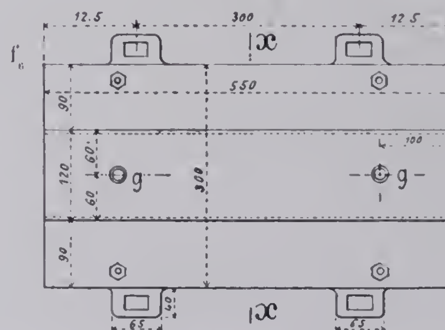
En dépit de ces menues critiques, c'est un fort joli pont.

2. Articulations (S_1). — Aux 3 articulations, il y a 33 rotules semblables (f_5, f_6), espacées de 10^{cm}, masquées aux têtes par des voussoirs.

Coupes — 10^{cm} [1]

sur xx de f_6 — sur yy de f_5



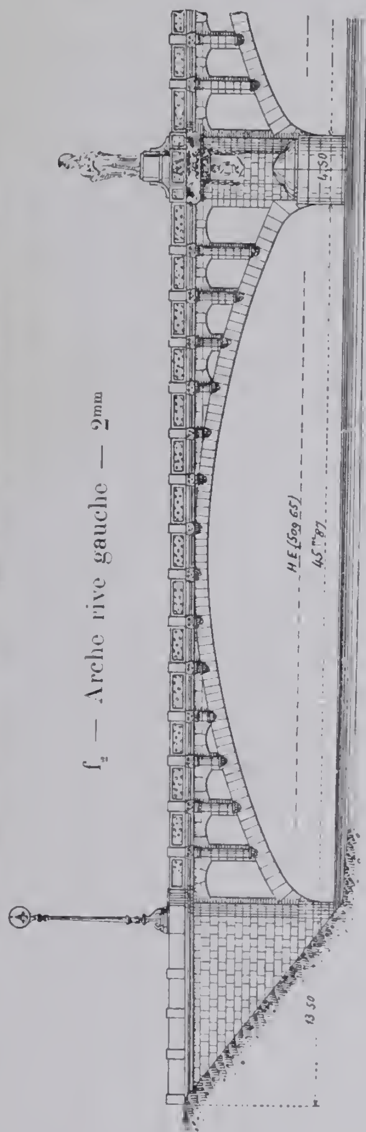


A la clef, tous les sabots, aux retombées, les sabots inférieurs, sont scellés dans le granit.

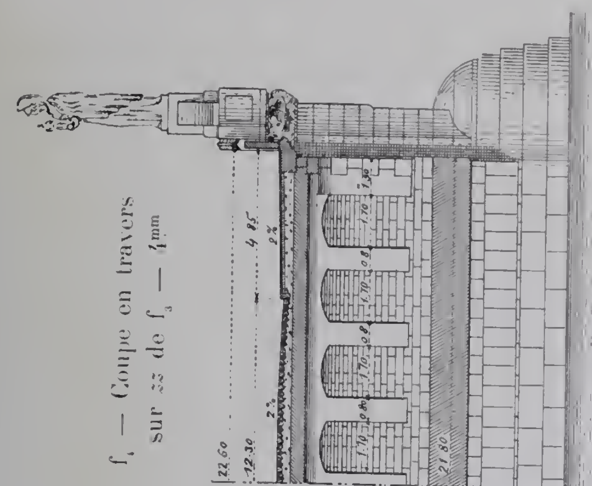
Pendant la construction, les sabots supérieurs se déplacèrent de 1^{cm} au plus : on eut quelque peine à les ramener.

1. — Les goujons g n'ont été mis qu'après l'accident du 27 juin 1904.

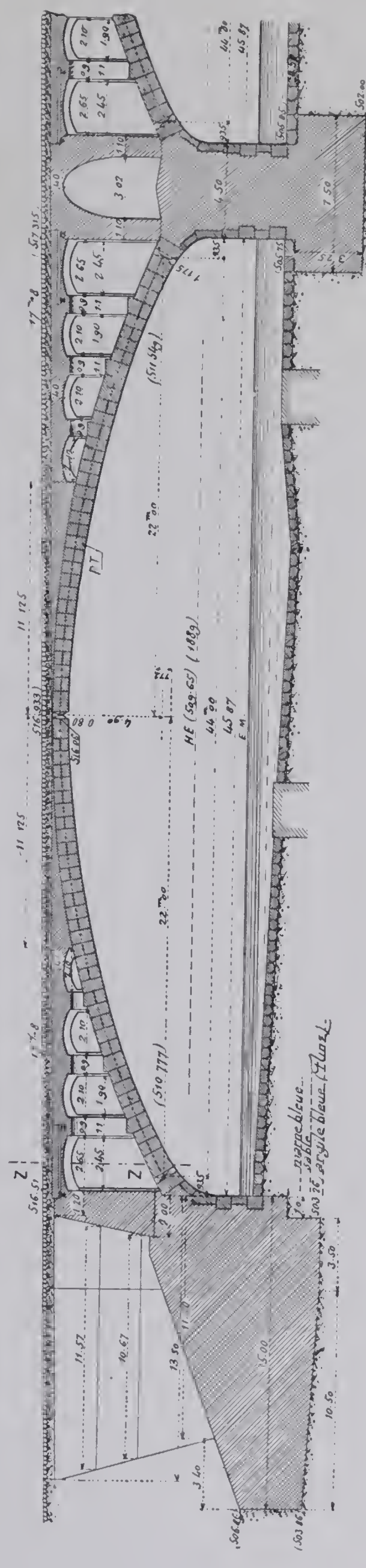
f1 — Ensemble — 1mm



f2 — Arche rive gauche — 2mm



f4 — Coupe en travers sur zz de f3 — 4mm



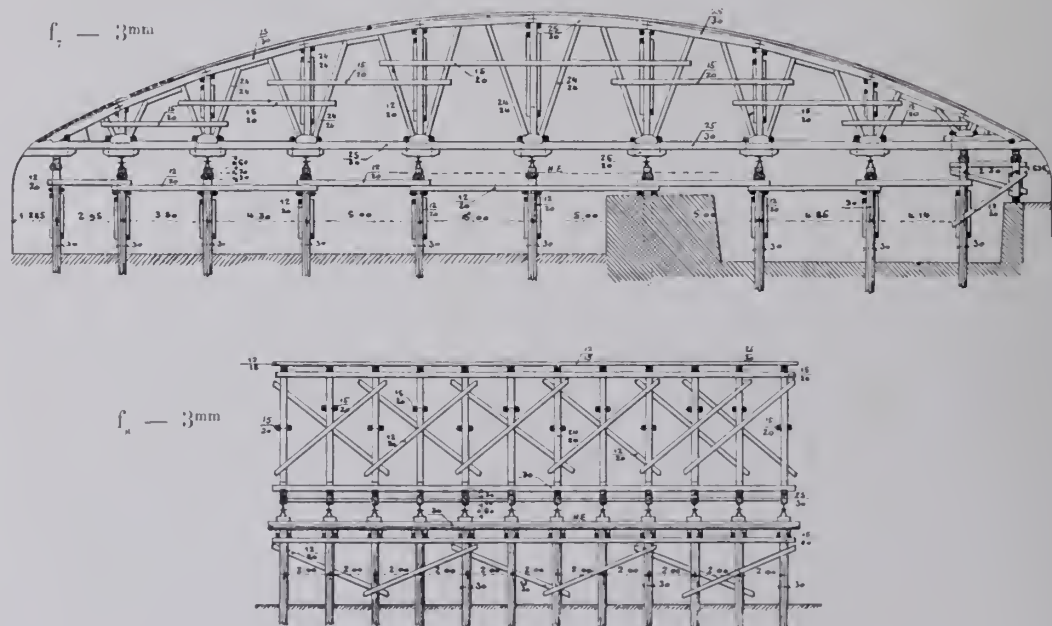
f3 — Coupe en long — 3mm

Φ_2 (S_4)



3. Cintre de l'arche rive droite (S'_4).

f_7 — 3mm



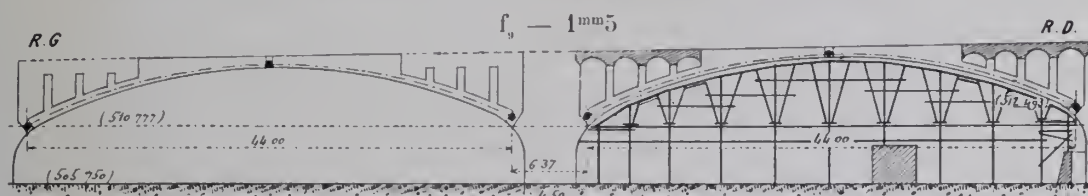
f_8 — 3mm

4. Premier décintrement des deux grandes voûtes (13 juin 1904; matin 6h–8h 1/2). — Elles portaient à ce moment les piliers des petites arches et le remplissage en béton du cerveau.

5. Chute des grandes voûtes (27 juin 1904) (S_2).

A. - Etat de l'ouvrage avant l'accident. — Le croquis f_9 montre l'état de l'ouvrage au moment de l'accident, 14 jours après le décintrement.

f_9 — 1mm5



Le cintre de rive gauche était enlevé; celui de rive droite descendu « *d'une* « *largeur de main* ».

B. - Observations faites.	Arche rive gauche	Arche rive droite — Retombée rive gauche	Arche rive droite — Clef	Arche rive droite — Retombée rive droite
Matin : 7h	....	....	Elle s'élève aux têtes de 11mm et 13mm	
9h	....	....	....	Glissement de 2mm sur toute la largeur
Soir : 1h	....	Glissement uniforme beaucoup plus grand qu'à la retombée rive droite		Glissement de 8mm
1h 1/2		Glissement visible à l'œil Chute		Chute aussitôt après celle de l'autre retombée
	Les deux retombées tombent aussitôt après la chute de l'arche rive droite.	Secousse qui fit croire à un tremblement de terre (S_4). — Durée de la chute : 0"4.		

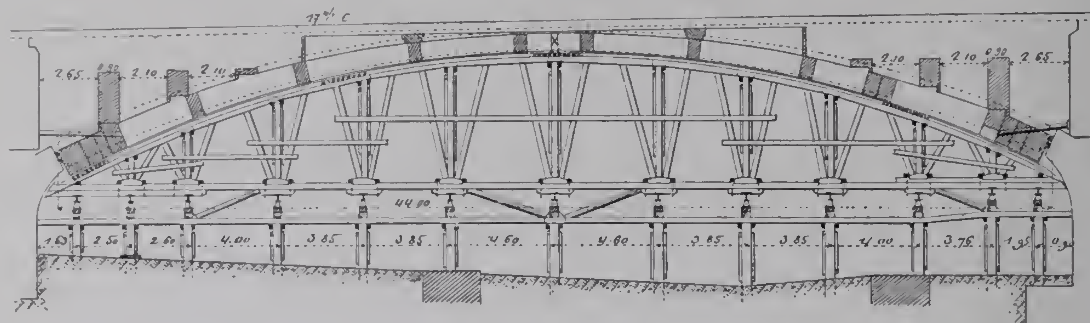
C. - Etat du Pont (voir f_{10} à f_{17})	Arche rive gauche	Arche rive droite
C_1 - Voûtes	Les blocs supérieurs des retombées reposent sur les assises inférieures de granit. Très heureusement, le frottement acier sur granit a arrêté le glissement et prévenu la chute de la voûte.	La voûte porte sur le cintre et sur les assises de granit de la pile et de la culée. — Quelques voussoirs de tête, notamment ceux qui masquent les rotules, sont épaufrés. — Quelques voussoirs de granit sont fissurés.
C_2 - Cintre de rive droite	....	Les semelles transversales sur les vérins sont cassées. — Les fermes portent directement sur eux.
C_3 - Rotules des retombées	Les sabots supérieurs sont en partie déplacés; beaucoup sont tombés.	
C_4 - Pile et culées	Les parements de tête sont épaufrés.	
C_5 - Piliers des voûtes d'élégissement	Ils sont pour la plupart déplacés.	

Reconstruction des voûtes (S_3)

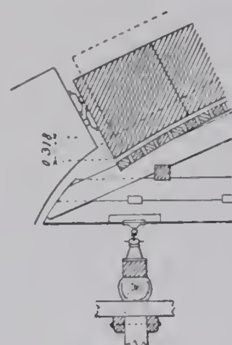
On a indiqué par des hachures ce qui a été refait

Arche rive gauche

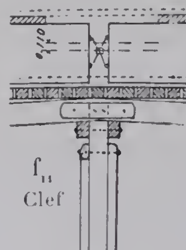
f_{10} — État de la voûte après qu'on eut reconstruit le cintre — 3mm



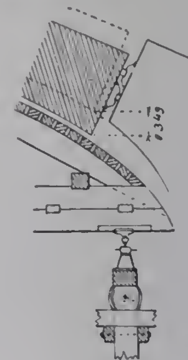
Détails — 1cm



f_{12} Retombée rive gauche



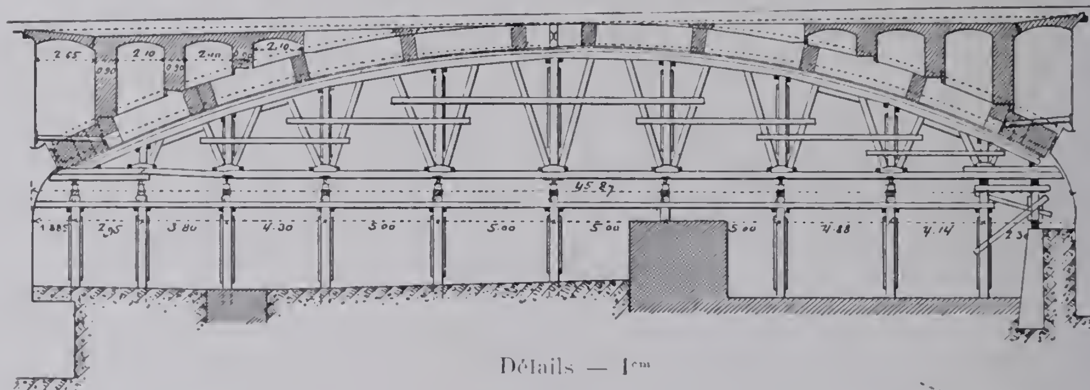
f_{11} Clef



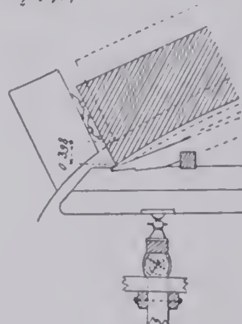
f_{13} Retombée rive droite

Arche rive droite

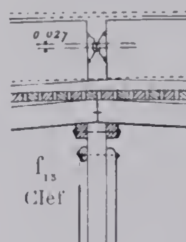
f_{14} — État de la voûte après l'accident — 3mm



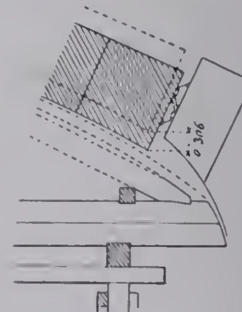
Détails — 1cm



f_{16} Retombée rive gauche



f_{15} Clef



f_{17} Retombée rive droite

D. - Causes de l'accident (S_2). — Les surfaces de contact des rotules avaient été polies, puis graissées à la stéarine. Le frottement acier sur acier était ainsi descendu de 0,235-0,216 (sans graissage) à 0,022-0,005 (graissage à la stéarine)[2].

Pour les grandes voûtes nues, les réactions aux retombées sont normales aux surfaces de contact.

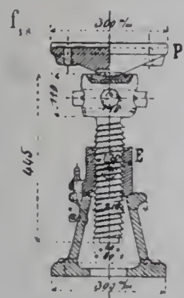
Quand le poids des voûtes d'élégissement construites sur la voûte rive droite les eut déviées d'un angle égal à l'angle de frottement des surfaces stéarinées, le glissement s'est produit (il n'y avait pas encore de goujons pour l'arrêter).

Sans graissage à la stéarine, les rotules n'auraient pu glisser que pour une déviation de 12° des réactions : aucune surcharge ne l'eût produite.

6. On reconstruit le cintre de rive gauche, on répare celui de rive droite (S_2).

— On boucha provisoirement au mortier de ciment les joints entre les rotules des retombées.

Vérins à plate-forme articulée — 5^cm



Sous l'arche rive gauche, on construisit un cintre épousant l'intrados déformé.

On remplaça les pièces brisées du cintre de rive droite.

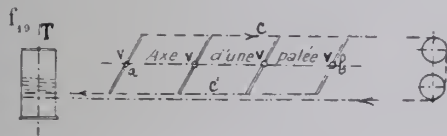
Sous les fermes des 2 cintres, on installa des vérins avec plate-forme P, articulée sur un écrou E un peu mobile sur sa base, pour diriger la réaction suivant l'axe (f_{18}).

7. On remonte les 2 voûtes[3] (S_2).

— On enleva les voussoirs épaufrés, plus nombreux aux têtes, et, de plus, quelques assises entières (f_{10}, f_{11}).

Les vérins d'une même file transversale *ab* (f_{19}) devaient s'élever en même temps de la même quantité.

Manœuvre des vérins — Plan — 5^mm



Les extrémités de leurs manivelles étaient mues par deux câbles C et C' s'enroulant autour d'un treuil horizontal T.

On avançait par 1/4 de tour, soit, en hauteur, par 3^mm7, jusqu'à l'intrados surhaussé de 40^mm.

Le cerveau du cintre fut à hauteur avant les retombées ; on le fixa par des chaînes attachées aux palées et on n'agit plus que sur les vérins des retombées.

8. On répare les 2 voûtes (S_2).

— Quand les voûtes furent remontées, on reconstruisit les assises enlevées ; on boucha les joints ouverts ; on plaça les assises d'appui des articulations, puis les rotules. La plupart purent être réemployées. Mais on les munit toutes de 2 goujons de 22^mm pour empêcher le glissement.

Les arches refaites furent décintrées en mai 1905.

2. — D'après les expériences de M. Föppl (Voir Tome IV, p. 22).

3. — Cette délicate opération fut habilement conduite par M. Probst, Ingénieur en chef de l'Entreprise.

9. Dates (S_1).

Commencement des travaux	septembre 1903
Construction des grandes voûtes (44 jours)	16 mars - 9 mai 1904
Ouverture à la circulation	9 juin 1905
Achèvement du pont	septembre 1905

10. Personnel (S_1).

Projet et Entreprise : MM. Sager et Wœrner, de Munich.

Direction des Travaux : M. Schwiening, Directeur des Travaux de la Ville.

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution (S'_1) et renseignements (S''_1), gracieusement communiqués par MM. Sager et Wœrner.

S_2. — Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1904, II, p. 1407 à 1411 : « *Der « Bauunfall der aüsseren Maximiliansbrücke in München* », von W. Dietz.

S_3. — Schweizerische Bauzeitung, 13 mai 1905, p. 236 à 239 : « *Die Rekonstruction der « Maximiliansbrücke in München* », von Professor Mörsch, in Zürich.

S_4. — Ce que j'ai vu — août 1908.

PONT DE WITTELSBACH, SUR L'ISAR, A MUNICH *(BAVIÈRE)*

en prolongement de la Kapuzinerstrasse

1904-1905 A^n r^te (≥ 40m)^7

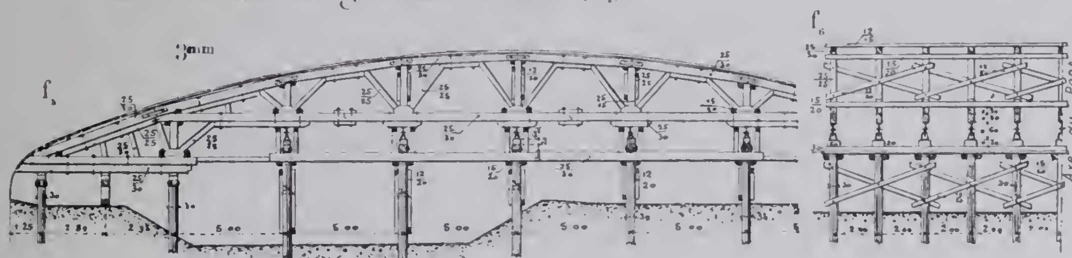
Φ₁ (S₁)



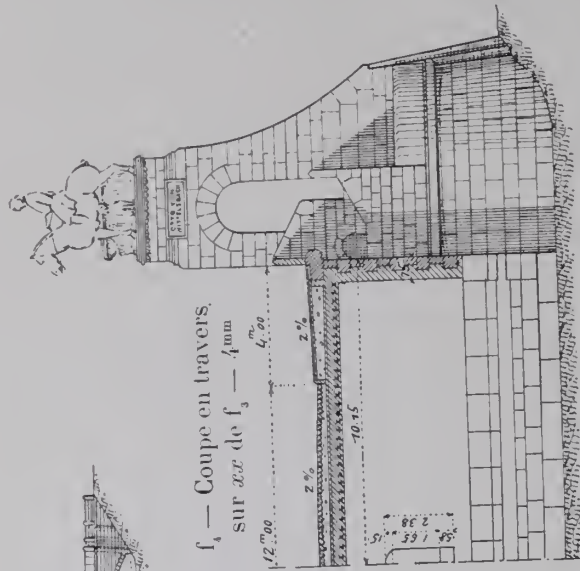
1. Aspect. — Sur l'avant-bec de la pile-culée de rive droite est édifié un piédestal portant la statue équestre d'Otto de Wittelsbach. Ce cheval est juché un peu haut.

2. Articulations. — Les mêmes qu'au pont Maximilien[1].

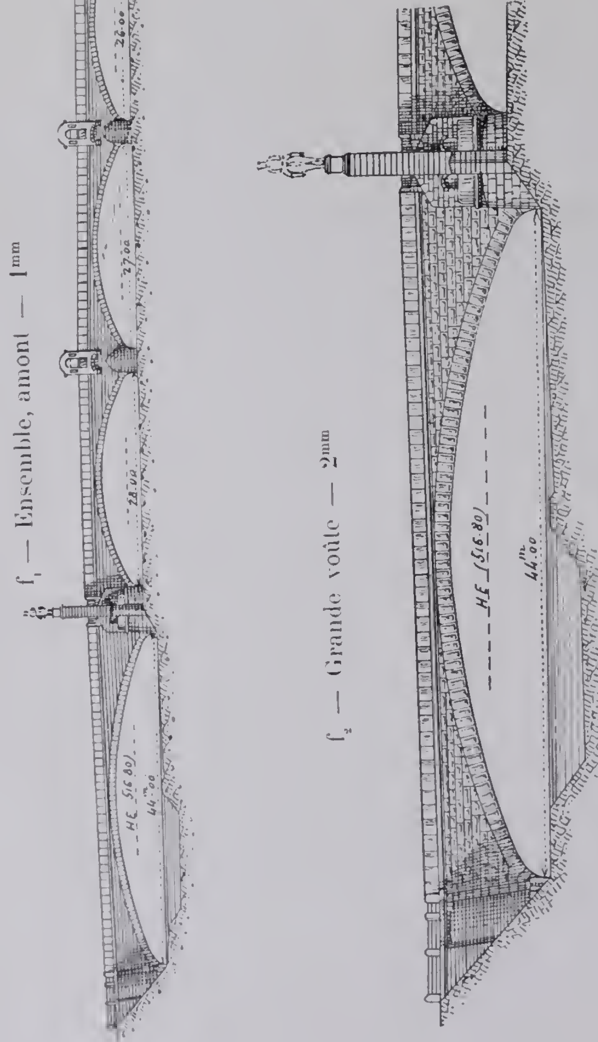
3. Cintre de la grande voûte (S₁).



1. — A^n r^te (≥ 40m)^6, f₅ et f₆. Tome IV, p. 192.

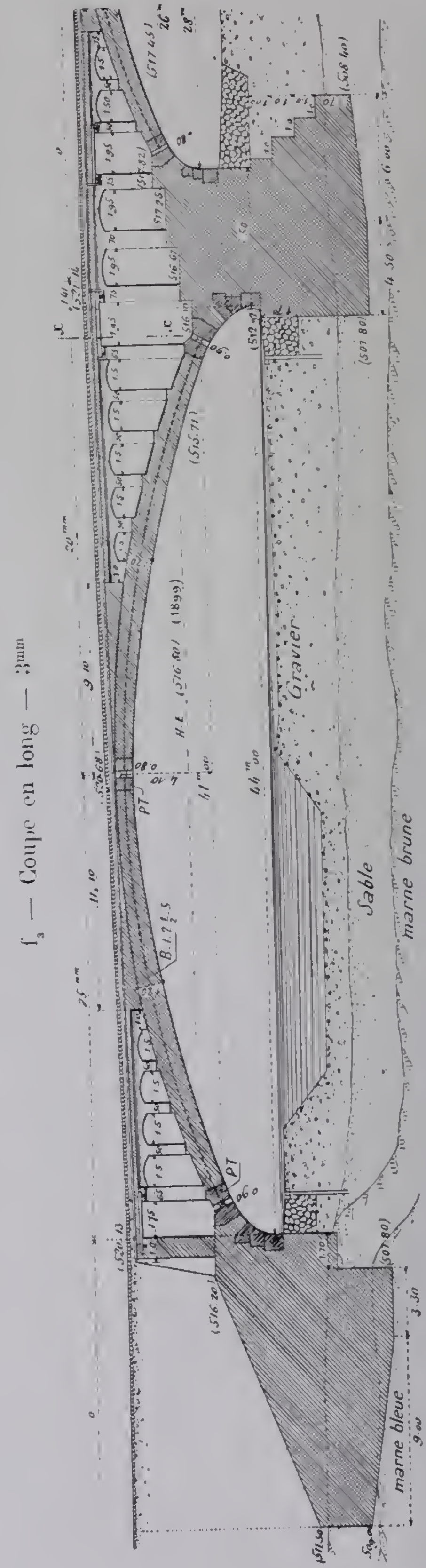


f_4 — Coupe en travers sur xx de f_3 — 4^{mm}



f_1 — Ensemble, amont — 1^{mm}

f_2 — Grande voûte — 2^{mm}



f_3 — Coupe en long — 3^{mm}

4. Personnel (S_2, S_3).

Projet et Entreprise : MM. Sager et Wœrner, de Munich.

Direction des Travaux : M. Schwiening, Directeur des Travaux de la Ville.

Architecture : M. le Professeur Th. Fischer (S_2).

SOURCES :

Dessins et renseignements gracieusement communiqués :

S_1, — par M. Schwiening ;

S_2, — par MM. Sager et Wœrner.

S_3. — Schweizerische Bauzeitung, 23 septembre 1905, p. 166 : « *Die Eröffnung der* « *Wittelsbacherbrücke in München* ».

S_4. — Ce que j'ai vu, - août 1908.

PONT SUR LA MOSELLE, PRÈS DE MOULINS-LEZ-METZ [1]

(LORRAINE ALLEMANDE)

Route de Moulins à Montigny

1904–1905 $\overline{\mathbf{A}}^{n}$ r^{te} ($\geqslant 40^{m})^{8}$

Φ_1 (S_4)



1. Aspect (S_3). — Le dos d'âne est un peu trop accusé (30^{mm}).

Les lourdes culées arrêtent bien ces arcs légers.

Comme à Malling [2], les becs des piles coupent durement les retombées des voûtes.

Les bandeaux, tympans, parements en élévation des culées, sont en moellons équarris jaunes, à bossages.

Aux têtes, les articulations ont l'aspect de libages piqués.

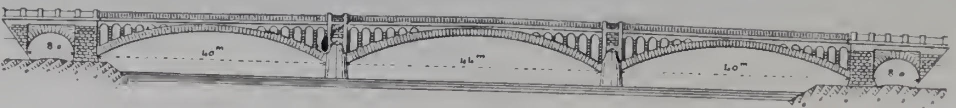
Les voûtes d'élégissement voisines de la clef sont aveuglées par un mur blanc.

Le béton n'apparaît qu'en douelle. Il affleure les retours des bandeaux ; aux voûtes des culées et aux grandes voûtes de rive au-dessus du chemin de halage, il a été piqué, pour effacer l'empreinte des voliges du cintre.

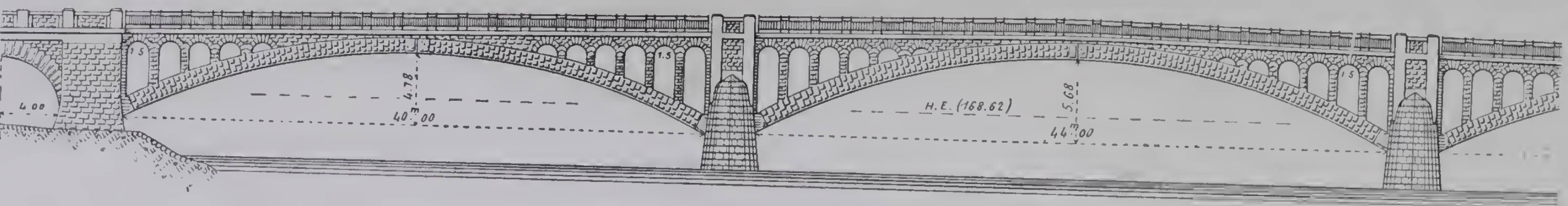
1. — à 6^k en amont de Metz, à 1^k environ de la station de Moulins (Ligne de Metz à Verdun).

2. — $\overline{\mathbf{A}}^{n}$ r^{te} ($\geqslant 40^{m})^{1}$ — Tome IV, p. 175.

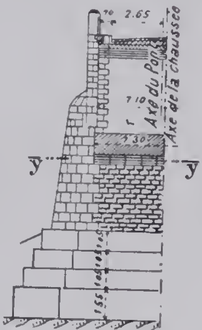
f_1 — Ensemble — 0mm75



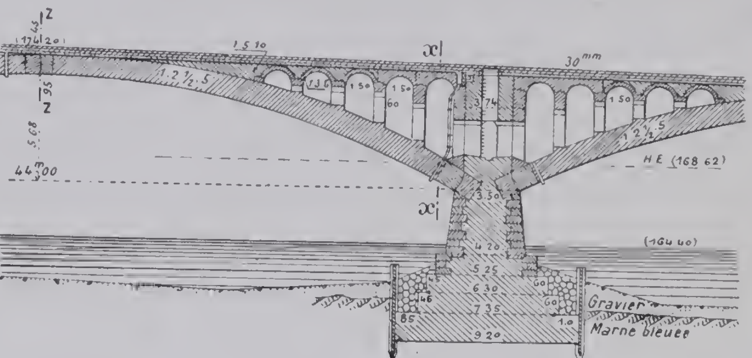
f_2 — Arche centrale et arche de rive — 2mm



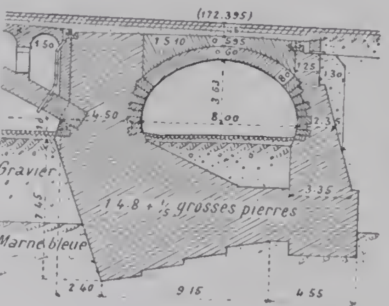
f_6 — Demi-coupe en travers sur xx de f_3 — 2mm5



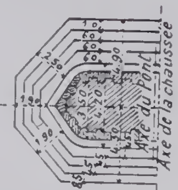
f_3 — Coupe en long au-dessus d'une pile — 2mm5



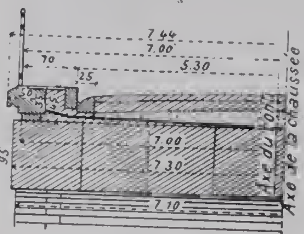
f_4 - Coupe en long d'une culée - 2mm5



f_7 — Demi-coupe horizontale sur yy de f_6 — 2mm5



f_5 — Demi-coupe en travers sur zz de f_3 — 1cm



2. Articulations en béton [3].

Arche centrale — $1^{cm}5$

f_8 — Clef

Retombées

f_9 — Élévation

f_{10} — Coupe

Arches de rive — $1^{cm}5$

f_{11} — Clef

Retombées

f_{12} — sur la culée

f_{13} — sur la pile

3. Exécution des grandes voûtes (S_1).

— Le béton était pilonné par tranches, dans l'ordre des numéros de f_{16}.

f_{16} — Ordre d'exécution des tranches

4^{mm}

3. — Voici comment on les a moulées :

Les parois latérales des moules sont en bois revêtu de tôle. Le fond, en fer, a la courbure voulue ; il est poli avec soin.

Pour avoir une surface de roulement plus unie, on applique contre le fond 3^{cm} à 4^{cm} de mortier (1' de ciment, 1' de sable fin) ; puis on pilonne le béton par couches de 10^{cm} à 15^{cm}.

Aux naissances, on a, le plus souvent, disposé sur toute la largeur du pont un gabarit convexe en fer, et pilonné en place, contre la culée, les blocs concaves.

Si l'on croisait les joints des deux files d'une articulation, les blocs s'appuieraient l'un sur l'autre par des points isolés (f_{14}). Il vaut mieux que les joints se continuent (f_{15}) : le contact se fait sur toute la largeur des blocs (S_2).

f_{14}

f_{15}

4. Dates d'exécution des voûtes (1905).

	Voûtes de rive	Voûte centrale	Voûtes de rive
Commencement	16 mai	2 juin	26 mai
Fin	25 mai	9 juin	31 mai

Décintrement des 3 voûtes .... 29 juillet

5. Personnel (S_1).

Ingénieur. — *Projet et Direction des Travaux :* M. Blumhardt, « Regierungs-und Baurat » à Strasbourg (Service de la Construction des Routes d'Alsace-Lorraine).

Entrepreneurs : MM. Windschild et Langelott, de Cossebaude, près Dresde.

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution (S'_1) et renseignements (S''_1) gracieusement communiqués par M. Blumhardt.

S_2. — Deutsche Bauzeitung, 1908, 23 mai, p. 283 à 288 ; - 3 juin, p. 303 et 307 : « *Die* « *Anwendung von Gelenken bei Brückenbauten* ». Communication faite au XIe Congrès du « Deutschen Beton-Vereins » tenu à Berlin en 1908, par M. A. Köhler, Ing. Dipl., Directeur technique de la Maison Windschild et Langelott.

S_3. — Ce que j'ai vu — août 1909.

PONT SUR LE NECKAR, A MANNHEIM *(ALLEMAGNE - Grand-Duché de Bade)*

Route de Neckarstadt à Mannheim

1905-1908 $\bar{\mathbf{A}}^{n}$ r^{te} $(\geqslant 40^{m})9$

Φ_1 (S_3)



1. Voûtes de rive rampantes. — Pour résister à la poussée de l'arc central, les retombées des voûtes de rive sur les culées extrêmes sont à $1^{m}30$ plus bas que leurs retombées sur les piles.

2. Bandeaux. — Les rotules sont cachées aux têtes par des voussoirs de granit, bien distincts des autres voussoirs, qui sont en grès rouge, par leur couleur et la sculpture de leur surface (Φ_1, Φ_2, Φ_3).

On voit un peu trop le renflement des reins (S_3).

3. Tympans. — Au droit des articulations des reins, ils sont coupés par un joint vertical ouvert, de 30^{mm}, très apparent (Φ_2, Φ_3).

Il eût peut-être convenu de bien séparer la partie du tympan mobile avec la voûte, de sa partie fixe avec la pile et la culée, par un appareil différent, par un cadre,... (S_3).

Les tympans sont, comme les bandeaux et le couronnement, en grès rouge. L'arche centrale, les candélabres, les poteaux de trolley, sont peints en vert. Ces deux couleurs complémentaires se heurtent.

Φ_2 (S_3)



4. Plinthe. — Elle a peu de saillie (S_3).

5. Chaussée. Trottoirs. — La chaussée est, sur chaque arche en béton, en rampe assez forte : 1/37, soit 27^{mm} par mètre.

Les trottoirs sont faits de plaques de béton armé recouvertes d'asphalte.

6. Décintrement. — Au décintrement de l'arche rive droite, sa pile-culée s'inclina vers la rivière; la voûte tassa plus qu'on l'avait prévu, et l'arc d'acier se releva ; il reprit son niveau sous une charge de 120 tonnes.

Le décintrement de chaque arche dura 4 heures.

7. Achèvement du pont. — Le tablier achevé, on a rempli au mortier de ciment l'intervalle entre les sommiers de granit des rotules, en maintenant le joint d'articulation par une feuille de feutre asphalté.

8. Épreuves. — On chargea chaque arche, puis tout le pont, d'abord d'un seul côté, puis entièrement, de 400^{k} de gravier par m. q.

On fit ensuite passer sur la chaussée des voitures de 15 et 20 tonnes.

Les épreuves durèrent 10 jours.

On observa une légère inclinaison des piles et culées.

(S.)



9. Personnel.

Projet (primé au Concours) : MM. Grün et Bilfinger, de Mannheim.
Entreprise : MM. Ph. Holzmann et Cie, de Francfort-sur-le-Mein.

SOURCES :

S_1. — Renseignements qu'ont bien voulu me communiquer MM. Grün et Bilfinger.

S_2. — Zentralblatt der Bauverwaltung, 29 mai 1908, p. 277 à 279 : « *Strassenbrücke über* « *den Neckar in Mannheim* ».

S_3. — Ce que j'ai vu, — août 1908.

Tout ce qui n'est pas spécifié S_1 ou S_3 est de S_2.

VOÛTES ARTICULÉES

ARTICULATIONS ROULANTES [1]

ARCS ASSEZ SURBAISSÉS [2]



PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS ROUTE

Série A[1] r[te] (⩾ 40m)

1. — Pour le classement des voûtes articulées et le sens des symboles, voir Tome IV, Livre I, p. 28 et 29.
2. — Série placée ici, après les arcs très surbaissés, au lieu de l'être avant. — J'en ai connu trop tard le seul pont.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

PONT	PROJET							
	ENSEMBLE		GRANDE VOÛTE					
Date Symbole	*Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets / *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Joints de rupture* Retombées	ROTULES *Pour les dimensions, rayons, pressions,... voir Tome IV, Livre III.*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg/0m01² Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Gräveneck** *Prusse, – Hesse* 1911-1912 $\widehat{A}$[1] r^te (⩾ 40m)[1]	*104m61* 15mm (pente) 15m19	5m70 *5m00* Pas de fruit 0m42	Portée entre appuis : 48m,00 Entre les axes des rotules : 48m,425 *7m75* $\frac{1}{6,248}$ = 0,160 *Rayon de courbure à la clef : 36m85*	0m,60 *1m02* 0m75	Béton armé par des grillages en fers ronds de 8mm normaux à la fibre moyenne Surfaces de roulement en mortier Ciment 1v Sable du Rhin 1v5 Béton : Ciment 1v Sable du Rhin 1v5 Eclats de basalte de 10mm à 15mm 2v5	Béton Ciment.......... 1v Sable du Rhin... 2v Pierre cassée (de 5 à 20mm - 2v, de 40 à 50mm - 3v) 5v	Pressions maxima : sans surch. / avec surch. Clef : 20k / 23k2 Joints derupt. : 12k4 / 33k6 Retombées : 19k4 / 22k5 Pas de tension 500k/1m² et Rouleau à vapeur de 15T 1 6 à 1 7 du poids mort	1° Plate-forme en béton armé sur piliers carrés de 25cm et 30cm d'arête 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6.

SÉRIE $\widehat{A}^1$ 1.te (⩾40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE

FONDATIONS	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES							CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q — DÉPENSE D
Nature du sol Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg : 0m01² *Procédé*	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	Cube de bois Poids de fer Dépenses par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Gravier, Argile, Blocs de rocher. Pression maxima : 4k5 *Épuisements sans batardeaux*	Fixe Montants et contrefiches Boîtes à sable	5 *18cm* 1m20 *60mm*			Par tranches isolées.	Plate-forme bétonnée. Joint vide ménagé entre la clef et chaque retombée *46 jours* 4 janvier	t_c = 28mm t'_v = 14mm	Q = 2160mc Q : S_p = 3mc62 Q : W = 0mc38

	Fondations	Élévation	Ensemble
D	32084f	74040f	106124f
D : S_p	53f8	124f2	178f0
D : W	5f7	13f2	18f9
D : Q	»	»	49f1

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES ARTICULÉES ARTICULATIONS ROULANTES
ARCS ASSEZ SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\widehat{A}^1$ r[te] (⩾ 40m)

MONOGRAPHIES

PONT SUR LA LAHN, A GRÄVENECK *(PRUSSE, – Hesse, – Présidence de Wiesbaden)*

Route de Wirbelau à Gräveneck

1911-1912 $\widehat{A}^1$ r[te] (⩾ 40m) 1

Φ_1 – amont (S'''_1)



1. Une grande voûte entre deux petites. — Sous l'arche de rive gauche passent deux voies de chemin de fer ; l'arche de rive droite sert de décharge.

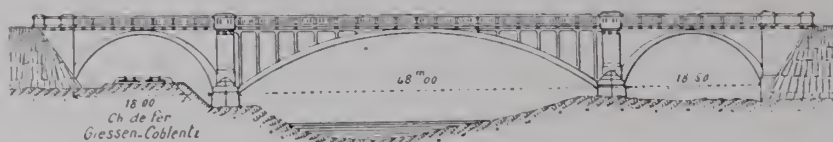
Pour qu'elles fissent culées, on les a élargies de 0m50, et chargées de béton jusqu'à la chaussée (f_3).

2. Pourquoi on a articulé l'arche centrale. — 1° – Parce que cet arc mince, non armé, est soumis à de grands écarts de température ;

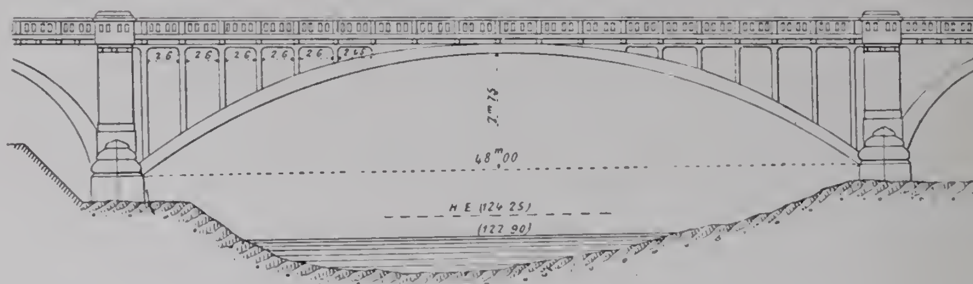
2° – Parce que le sol sous la pile rive gauche est peu résistant.

3. Pourquoi on a fait les rotules en béton armé. — Parce qu'elles sont plus homogènes qu'en pierre.

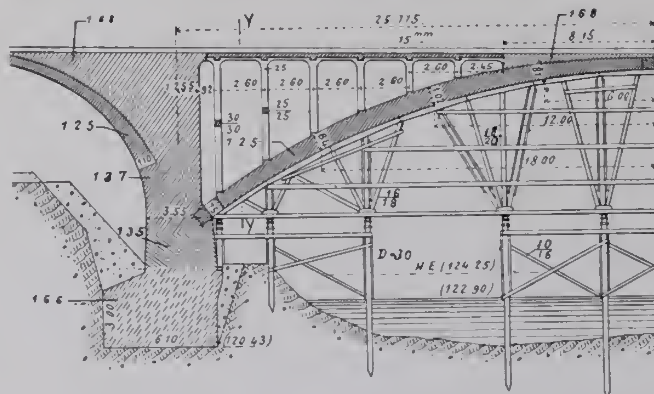
f_1 — Ensemble, amont — 1mm



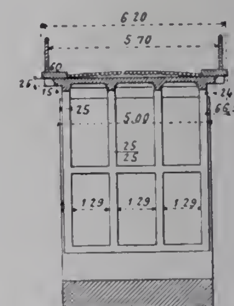
f_2 — Grande voûte — 2mm



f_3 — Demi-coupe en long, et cintre — 2mm5



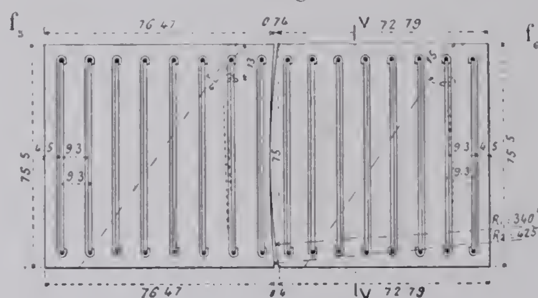
f_4 — Coupe en travers sur yy de f_3 — 4mm



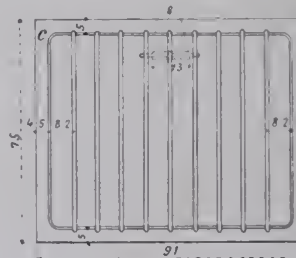
Rotules de retombée — 4cm

Coupes

en long



en travers, sur rr de f_5



4. Rotules en béton armé. — *A. - Projet.* — Les cadres c (f_6) maintiennent les fers pendant l'exécution, et frettent le béton.

Il n'y a pas de fers dans le sens du pilonnage.

B. - Exécution — Les moules étaient en bois recouvert de tôle ; la base, en plâtre très exactement dressé suivant la surface cylindrique de roulement : le plâtre a été remplacé à chaque bloc. On l'enduisait de mortier, puis on pilonnait le béton à l'état de terre humide, par couches de 10cm.

Avant de placer les fers, on les enduisit d'un lait de ciment.

On mit les rotules en place au bout de 2 à 3 mois.

C. - Expériences au Laboratoire mécano-technique de Dresde. — Voici ce qu'ont donné, à un an, des rotules de mêmes dimensions que celles du pont :

	Dimensions en 0m01			Charge en tonnes par 0m01 d'arête de contact, provoquant les fissures	Compression, en 0m001, de la longueur L (f_7) sous une charge de 11T par 0m01 d'arête de contact
	$e = h =$	R_1	R_2		
Clef	60c	350c	450c	10T	2mm06
				10	2 45
				11	1 95
Retombées	75,5	340	425	10	1 86
				10	2 01
				10	2 36

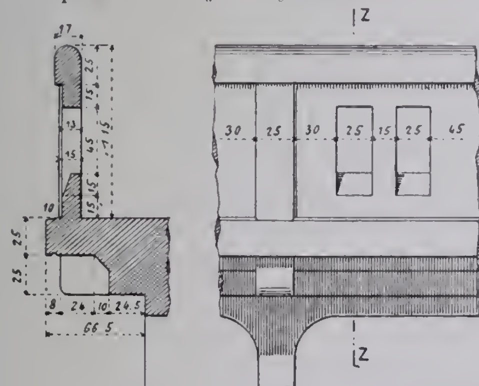
La charge enlevée, les fissures se sont refermées.

Le coefficient de sécurité, par rapport à la charge des premières fissures, est entre 6 et 7.

Les empreintes de contact étaient très irrégulières[1].

Couronnement — 2cm

f_9 – Coupe sur zz de f_8 f_8 – Élévation



5. Joints de dilatation. — Il y en a au-dessus des rotules, puis 2 autres dans la plate-forme, ceux-ci, jusqu'après décintrement.

6. Couronnement (f_8, f_9). — Les bahuts des parapets sont en blocs séparés, longs de 1m, de béton moulé.

1. — Largeur de contact $2x$ et pression maxima au contact MAX β, d'après les formules de Hertz et de Barkhausen (S_1) (Voir Tome IV, p. 11 et 13), avec $E = 1.8 \times \overline{10}^5$ (Kg/$\overline{0^m01}^2$) :

	Charge en Kg par 0m01 d'arête de contact N	$2x$ (en 0m01) d'après Hertz	$2x$ (en 0m01) d'après Barkhausen	MAX β (en Kg $\overline{0^m01}^2$) d'après Hertz	MAX β (en Kg $\overline{0^m01}^2$) d'après Barkhausen
Clef........	1394k	10cm8	17cm6	164k	90k
Retombées.	1683	12 1	20 4	177	93

7. Chape. — Sur la plate-forme, on a étalé des feuilles de plomb, puis de l'asphalte, puis du béton ; sur l'extrados, un enduit étanche.

8. Matériaux. — Les arêtes des avant-becs sont en pierre.
Les parements vus sont en béton à grain fin.
En douelle, on a enlevé les empreintes du platelage.

9. Dates (S''_1).

Commencement des travaux	20 juin 1911
Grande voûte	15-19 novembre
Décintrement	4 janvier 1912
Ouverture à la circulation	1er octobre

10. Personnel. — *Projet (au concours), et Entreprise* : MM. Hüser et Cie, d'Obercassel.

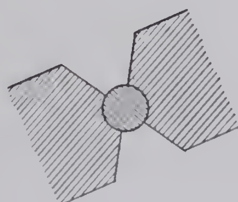
SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution (S'_1), renseignements (S''_1) et photographie (S'''_1), gracieusement communiqués par M. Schluckebier, — juillet 1913.

S_2. — Beton und Eisen, 12 juin 1913, p. 217 à 220 : « *Brücke über die Lahn bei* « *Gräveneck* », von Reg.-Baumeister a. D. Schluckebier, - Obercassel (Siegkr.).

Texte. — Ce qui n'est pas spécifié S''_1 est de S_2.
Dessins. — Ils sont réduits de S'_1.

ARTICULATIONS TOURNANTES [1]



Symbole : [2]

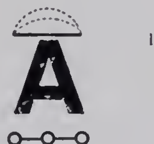


Voir Tome IV, Livre I :
1. — p. 21, pour la définition de l'articulation tournante,
2. — p. 28, pour le sens du symbole.

VOÛTES ARTICULÉES

ARTICULATIONS TOURNANTES [1]

ARCS TRÈS SURBAISSÉS [1]

 [1]

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS ROUTE

Série A[1] r^te^ (⩾ 40^m^) [1]

1. — Pour le classement des voûtes articulées et le sens des symboles, voir Tome IV, Livre I, p. 28 et 29.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

PONT - Date Symbole	PROJET ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	GRANDE VOÛTE INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Joints de rupture* Retombées	ROTULES *Pour les dimensions, pressions,... voir Tome IV, Livre III.*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg /0m01² Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
d' **Inzigkofen** *Hohenzollern* 1895 $\overline{\text{A}}^1$ r^te (⩾ 40m)1	*50m* 25mm 25mm 6m60 étiage	3m 80 *3m 60* *entre bandeaux à la clef* Fruit de la voûte : 1/8,76 Tympans à fruit courbe »	Sur le sol de fondation : 47m,90 *8m 30* *moyenne* $\frac{1}{5,771} = 0,190$ *Rayon de courbure à la clef : 65m* Entre axes des rotules : 43m,00 *4m 38* $\frac{1}{9,81} = 0,102$	0m 70 *1m, 10* 0m 78	Tourillons et balanciers en fonte	B [1] fait à la main 1v Ciment Stuttgarter Zement-fabrik Blaubeuren et Sable / Gravier / Pierre cassée Corps : 2v5 / 0v5 / 4v Près des rotules : 2 / 0.5 / 2.5 Sommiers : 1.5 / 0.75 / 0.75	Pression maxima : Clef : 43k9 Joints de rupture : 37k7 Tension = 1k Retombées : 42k9 Dans les autres sections : 37k 7 400k / 1m2 et Rouleau à vapeur de 15T	1° Plate-forme en béton sur 3 murs de 0m70, espacés de 0m675, percés de 14 voûtes transversales vues, en plein cintre de 1m15 et 1m.. sur piles de 0m60 2° *Moulures comme d'un cr... en font...*
de **Neckarhausen** *Hohenzollern* 1899-1900 $\overline{\text{A}}^1$ r^te (⩾ 40m)2	*55m 50* 15mm 15mm 8m étiage	3m 50 *4m 80* *entre bandeaux à la clef* Voûte à fruit parabolique Tympans à fruit courbe »	Sur le sol de fondation : 59m,40 *12m 585* *moyenne* $\frac{1}{4,719} = 0,212$ *Rayon de courbure à la clef : 90m* Entre axes des rotules : 50m,00 *4m 545* $\frac{1}{11} = 0,091$	0m 85 *1m, 20* 0m 90	Tourillons en acier Balanciers en fonte	B [1] Ciment lent...... 1v Stuttgarter Zement-fabrik Blaubeuren Sable .... 2v5 (Porphyre ou calcaire, broyés) Pierre cassée.... 5v	Pression maxima dans la voûte : 39k 8 Trottoirs : 500k / 1m2 Chaussée : 400k / 1m2 et Rouleau à vapeur de 15T	1° Plate-forme en béton de 0m32 sur 4 m... de 0m60, espaces de 0m73, percés de 14 voû... transversa... vues, en ellipse de 1m3. sur piles de 0m52 2° *Moulures comme d'un arc en font...*

1 — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, page II, n° 6.

SÉRIE $\underset{\infty}{\overline{A}}{}^{1}$ 1re (⩾ 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE

FONDATIONS ...ature du sol Profondeur ...ous l'étiage Pressions sur le sol kg $\overline{0^{m}01}^{2}$ *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	FERMES Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	Cube de bois Poids de fer Dépenses par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
...ve droite : *Rocher* » Pression maxima : $2^{k}6$ » —— ...ve gauche : *Gravier* » Pression maxima : $3^{k}7$ *Quelques ...aisements dans ...e enceinte de pieux palplanches*	Fixe Montants et contrefiches *Pin* Boites à sable	4 *Fermes de rive* *16^cm^* *Fermes intermédiaires.* *18^cm^* 1^m^07 *153^mm^*	3949^f^	18^f^7	A pleine épaisseur, à partir des retombées, par tranches de 1^m^ à 1^m^30	Tympans achevés *35 jours* 12 octobre	am^t^ / aval (mm) t_c 49 / 43 t'_v 7.5 / 7.7 t''_v (121 j.) 26.5 / 29.5 Recul de la culée rive gauche au décintrement 0^mm^3	Q = 634^mc^ $Q : S_p$ = 3^mc^33 Q : W = 0^mc^45 **D = 32 824^f^** $D : S_p$ = 172^f^8 D : W = 23^f^3 D : Q = 51^f^8
Marne ...omitique — 6^m^ *...aisements ...n fouille blindée*	Fixe Montants et contrefiches *Pin* Vérins à vis	4 *18^cm^* 1^m^30 *200^mm^*	100^mc^ » 6125^f^	0^mc^35 » 21^f^9	A pleine épaisseur, à partir de la clef, par tranches symétriques	Couronnement posé *56 jours* 28 août	am^t^ / aval (mm) t_c 66.7 / 78.1 t'_v 12.1 / 12.5 t''_v (215 j.) 26.9 / 31.3	Q = 1440^mc^ $Q : S_p$ = 4^mc^72 Q : W = 0^mc^62 **D = 86 800^f^** $D : S_p$ = 284^f^3 D : W = 37^f^2 D : Q = 60^f^3

...ur le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

PONT Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE: *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	PROJET — ENSEMBLE: Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	PROJET — GRANDE VOÛTE: INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons*	GRANDE VOÛTE: ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Joints de rupture* Retombées	GRANDE VOÛTE: ROTULES *Pour les dimensions, pressions,... voir Tome IV, Livre III.*	GRANDE VOÛTE: MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	GRANDE VOÛTE: PRESSIONS en kg $\overline{0^m01}^2$ Surcharges supposées	1° ÉVIDEME[…] DES TYMPA[…] 2° *DÉCORAT[…] DES TÊT[…]*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
du **Prince-Régent** à **Munich** *Bavière* 1900-1901 A[1] r^te^ (⩾ 40m)[3]	*103m* Courbe de la chaussée, en profil en long : $x^2 = 2730\,y$ Déclivité maxima : 18mm 11m20 étiage	17m 20 *17m 00* Pas de fruit 0m46	Arc avec raccord vertical aux retombées Portée entre appuis : **62m,40** Entre les axes des rotules : **63m,00** *6m 50* $\frac{1}{9,692} = 0,103$ *Rayon de courbure de la fibre moyenne à la clef : 80m*	**1m,00** *1m,48* 1m20	Tourillons en acier coulé entre balanciers en fonte appuyés sur sommiers en granit	PT [1] Muschelkalk *Ciment Portland 700k* *Fabriques de Karlstadt sur le Mein et Dyckerhoff et fils d'Amöneberg sur le Rhin* *Sable tamisé* *Joints de 25mm*	Pression maxima : Clef : 41k7 Joints de rupture : 39k Retombées : 43k 500k 1m2 et Rouleau à vapeur de 20T	1° Entr[…] tympans pl[…] voûtes d'[…] en béto[…] sur pili[…] en maçon[…] de 52[…] 2° *A la cl[…] Cartouc[…] en bron[…] aux arm[…] royale[…] Sur les tympa[…] monogram[…] du Prince-R[…]*
Max-Joseph à **Munich** *Bavière* 1901-1902 A[1] r^te^ (⩾ 40m)[4]	*104m 60* 20mm 20mm 11m50 étiage	18m,10 *18m 60* Tympans à fruit courbe 0m475	Arc avec raccord vertical aux retombées Au-dessus des naissances : **64m,00** *8m 00* $\frac{1}{8} = 0,125$ Entre les axes des rotules : **60m,00** *6m 00* $\frac{1}{10} = 0,10$ *Rayon de courbure de la fibre moyenne à la clef : 67m*	**1m,05** *1m,40* 1m20	Comme au Pont du Prince-Régent A[1] r^te^ (⩾ 40m)[3]	PT [1] Muschelkalk *Ciment Portland* *Dyckerhoff et fils* *700k*	Pression maxima (au joint de rupture) 45k 500k/1m2	1° En trav[…] 10 voût[…] vues, en ellip[…] de 2m53 a[…] en lon[…] 6 voûte[…] en ellip[…] de 2m2[…] Pilier[…] de 90×[…] Tout en [...] de grav[…] 2° *A la cl[…] Cartou[…] en bron[…] aux arm[…] de Mun[…]*

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6.

SÉRIE $\underset{\circ\circ\circ}{\overset{\frown}{A}}{}^{1}$ r^le^ (⩾ 40^m^)

TABLEAU SYNOPTIQUE (*Suite*)

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg par 0m01² *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	FERMES Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	Cube de bois Poids de fer Dépenses par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité de surface utile S_p [3], de volume « utile » W [4].
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Marne *Résistance :* [illegible] *0m01²* *Gravier* – 6m sous le lit Pression maxima, avec surcharge : 4k8 *Épuisements*	Fixe Montants et contrefiches *Pin et Sapin* *Nœuds en chêne* Vérins à vis	9 *24cm* 2m00 *120mm*	650mc 3000k 49360f	0mc61 2k8 46f1	Voussoirs posés à sec, avec joints de 2cm5, matés ensuite au mortier à Ciment 1v Sable tamisé 1v	Tympans et la plupart des voûtes d'évidement, exécutés *55 jours* 29 mai	t_c = 55mm t'_v = 34mm Recul de la culée RG 2mm	Q = 9800mc Q : S_p = 5mc53 Q : W = 0mc65 D = 740 400f D : S_p = 417f9 D : W = 49f4 D : Q = 75f6
Marne – 6m10 Pression maxima : 5k *[Ép]uisements*? *…mille boisée*	Fixe Montants et contrefiches *Sapin* *Pièces fatiguées en chêne et mélèze* Vérins à vis	9 *24cm* 2m10 *120mm*	680mc 3000k 55530f	0mc55 2k4 44f6	A pleine épaisseur	Voûtes d'évidement construites *12 jours* 25 juin	t_c = 45mm t'_v { 35mm, 37mm	PT [1] 1930mc B [1] 8145mc Q = 10075mc Q : S_p = 5mc48 Q : W = 0mc55

	Fondations	Élévation	Ensemble
D	182921f	689601f	872522f
D : S_p	96f6	364f3	460f9
D : W	9f7	36f5	46f2
D : Q	»	»	84f1

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES ARTICULÉES ARTICULATIONS TOURNANTES
ARCS TRÈS SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\overline{A}^1$ r[te] (> 40m)

MONOGRAPHIES

PONT SUR LE DANUBE, A INZIGKOFEN[1] (*ALLEMAGNE, — Hohenzollern*)

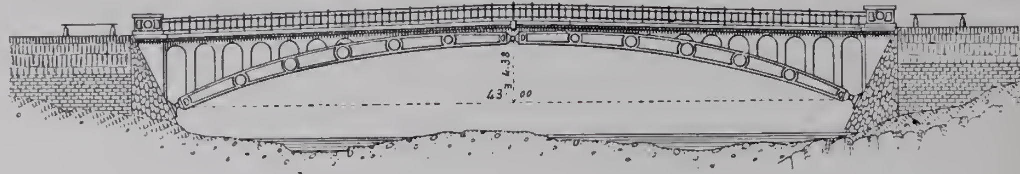
1895 $\overline{A}^1$ r[te] (> 40m)[1]

Φ_1 — amont (S_2)

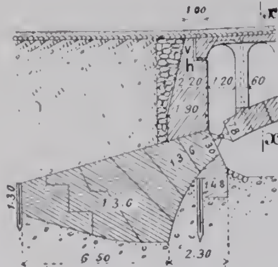


1. — à 6km en amont de Sigmaringen.

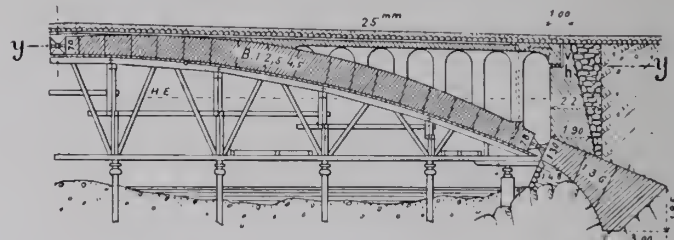
f_1 — Élévation — 2mm



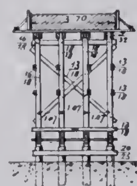
f_3 — Culée rive gauche — 3mm



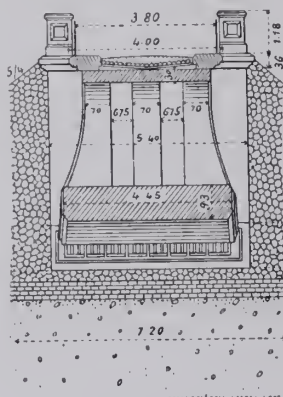
f_2 — Coupe en long et cintre, côté rive droite — 3mm



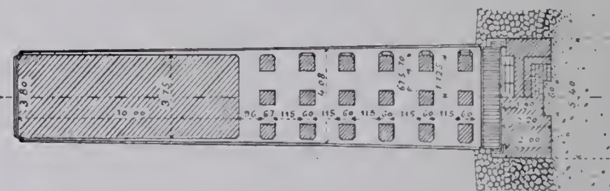
f_4 — Coupe en travers du cintre 3mm



f_5 — Coupe en travers sur xx de f_3 — 5mm



f_6 — Coupe horizontale sur yy de f_2 — 3mm



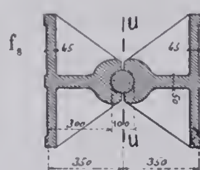
f_7 — Coupe le long de l'extrados

Rotules

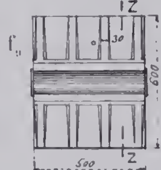
Coupes — 3cm

à la clef

sur zz de f_9 — sur uu de f_8



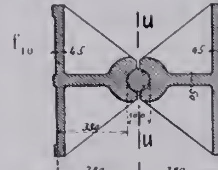
f_8



f_9

aux retombées

sur zz de f_{11} — sur uu de f_{10}



f_{10}



f_{11}

1. Le pont est en béton. — La voûte est un arc en béton à culées perdues, à 3 rotules découvertes, en fonte.

On a tout fait en béton par économie : on avait, à portée, du gravier, du sable, des cailloux, d'excellent ciment.

On voit de suite que c'est un pont moulé : pas de lits, pas de joints ; aux têtes, des ornements comme de métal coulé, des arêtes chanfreinées. On dirait d'un arc en fonte.

2. Joints de dilatation (f_2, f_3). — On a ménagé, au niveau des naissances des dernières voûtes d'élégissement, un joint vide, d'abord horizontal *h* glissant sur des rouleaux (S_1), puis vertical *c* jusqu'à la chaussée.

Si les voûtes extrêmes ne portaient plus sur les rouleaux de *h*, elles seraient tenues par 4 rails de 0^m90.

Le garde-corps en fer est coupé à la clef.

Au-dessus de la clef, la chaussée est soutenue par des fers Zorès.

3. Écoulement des eaux. — La chape est en feutre asphalté de 6^{mm}.

Un fer Zorès dans l'axe du pont conduit l'eau à des gargouilles traversant la voûte près des retombées (f_2, f_3).

4. Chaussée. — Sur la chape, on a étalé successivement 10^{cm} de sable ; puis l'empierrement qui a 6^{cm} aux bords, 10^{cm} au milieu ; puis 8^{cm} de gravier ; enfin, une mince couche de sable.

5. Matériaux.

A. - Ciment.

Durée de la prise : 7 h.

Finesse de mouture : résidu de 1 % au tamis de 900 mailles par $\overline{0^m01}^2$, - de 18 % au tamis de 5000 mailles.

Résistance à la traction (mortier à 1 pour 3 de sable normal) :

à 7 jours....................	18^k8
à 28 jours....................	23^k5

B. - Sable.

Par rapport au sable normal, il avait :

42 % de grains plus fins,
42 % de grains plus gros,
16 % de grains de même grosseur.

Avec ce sable, le mortier était de 20 % plus résistant qu'avec le sable normal.

C. - Béton.

	Composition — Pour 1^{v} de ciment — Sable	Gravier — fin jusqu'à 2^{cm}	Gravier — de 1^{cm} à 5^{cm} 37 % de vides	Pierre cassée calcaire de 4 à 6^{cm} 46 % de vides	Densité	Résistance à la rupture — Cubes de 25^{cm} d'arête, prélevés au moment de l'emploi — Age	Charge de rupture
	extraits des fouilles du Rheinthalgletscher près de Sigmaringen						
Murs en retour des culées	4^{v}		8^{v}				
Fondation de la culée rive gauche (avec 1/4 de blocs calcaires, gros comme le poing)	3^{v}		6^{v}		2320^{k}	213^{j}	198^{k}
Culée rive droite, piliers et voûtes d'élégissement	3^{v}		6^{v}				
Grande voûte — Corps	$2^{v}5$	$0^{v}5$		4^{v}	2290^{k}	160^{j}	181^{k}
Grande voûte — Au voisinage des rotules	2^{v}	$0^{v}5$		$2^{v}5$	Pendant la confection et le durcissement des cubes, il faisait très chaud		
Grande voûte — Au contact des rotules	$1^{v}5$	$0^{v}75$		$0^{v}75$	2250^{k}	160^{j}	259^{k}
Plate-forme supportant la chaussée	$2^{v}5$	$0^{v}5$		4^{v}			
Tous les parements vus (le ciment était coloré avec 6 % d'ocre jaune)	2^{v}						
Dalles des trottoirs	2^{v}		3^{v}				

Le béton était fait à bras. On variait la quantité d'eau suivant la température (elle a atteint 50°).

6. Calculs.

A. - Hypothèses. — On a admis comme surcharge roulante une foule pesant 400^{k} m. q. et un rouleau à vapeur de 15^{T}, ayant 2^{m} de largeur et $2^{m}775$ entre essieux.

B. - Résultats. — *B_1. - Courbes de pression.* — On obtient la même courbe de pression, soit en plaçant le rouleau à vapeur dans la position la plus défavorable, soit en étalant sur une demi-voûte une surcharge double.

B_2. - Efforts.

		Pressions maxima	Pressions minima	Tension
dans la voûte	à la clef (appui des rotules)	$43^{k}9$		
	aux joints de rupture	$37^{k}7$		1^{k}
	aux retombées (appui des rotules) — sans vent	$32^{k}5$		
	aux retombées (appui des rotules) — avec vent	$42^{k}9$		
sur le sol de fondation	rive gauche (gravier)	$3^{k}7$	$2^{k}1$	
	rive droite (rocher)	$7^{k}7$	$5^{k}3$	

La culée rive droite a une fois 1/2 la largeur de la voûte à la clef ; la culée rive gauche, deux fois.

7. Cintre. — L'espacement des fermes augmentait vers les retombées à cause du fruit.

Le platelage de 6^{cm} débordait pour recevoir les cloisons de tête (f_1).

Les boîtes à sable portaient des coins, avec lesquels on mettait le cintre au niveau voulu.

8. Fondation de la culée rive gauche. — Le fond de la fouille a été soumis à une charge d'épreuve de 3^k6, au moyen de plaques de fonte de $22^c \times 22^c$. Le tassement du gravier fut de 6^{mm} ; il n'augmenta pas en 18 heures.

Le béton, posé à sec, était pilonné par couches horizontales de 15^{cm} au plus, derrière des cloisons sensiblement normales à la courbe de pression (f_2, f_3).

9. Exécution de la voûte. — Pendant la construction, les coussinets de chaque articulation étaient solidarisés par des boulons, qu'on enleva avant le décintrement.

Les rotules de clef ont été posées sur le platelage ; celles des reins étaient maintenues par des triangles de bois (f_2).

On chargea d'abord de 40 tonnes le cerveau du cintre sur 6^m de long et 3^m de large.

Puis on bétonna, des naissances vers la clef, en ménageant des vides de 25^{cm} derrière les rotules, de 1^m à 1^m20 aux joints de rupture.

En même temps, on enlevait la charge placée au cerveau.

On pilonnait le béton par minces couches horizontales derrière des cloisons transversales en planches, normales à la courbe de pression, et disposées à 1^m ou 1^m30 de distance.

Les cloisons de tête étaient recouvertes de papier fort ; leurs joints avaient été bouchés au plâtre. On y fixait les liteaux et les moules des têtes.

Le crépi de parement était fait avec la voûte.

Le platelage n'était raboté que sur 0^m20 à partir des têtes. Deux liteaux de 2^{cm} d'épaisseur limitaient cette zône.

On clava aux naissances, à la clef, puis aux joints de rupture.

On avait bétonné la voûte en une semaine, soit 36^{mc} par jour.

On y avait employé 11 hommes : 5 pour faire le béton, 3 pour le transporter, 3 pour le pilonner.

10. Décintrement. — On abaissa le sable de 1^{cm} à partir des culées : la clef remonta d'abord de $2^{mm}5$, puis descendit de 5^{mm} ; la voûte se détacha à partir des retombées.

Un nouvel abaissement de 1^{cm} de toutes les boîtes décolla toute la voûte. La clef tassa encore de $2^{mm}5$ à l'amont, de $2^{mm}7$ à l'aval.

Le décintrement dura 25 minutes.

11. Tassements de la clef.

Dates		Phases de la construction	Température moyenne en degrés Centigrades	Abaissements en mm — totaux — amont	totaux — aval	partiels — amont	partiels — aval
1895							
Août	15	Achèvement du cintre..................	*15°*	»	»		
	29	Commencement de la voûte (après chargement du cintre)..................	*17°*	12	9		
Septembre	7	Clavage..............................	*20°*	a)35	a)34	23	25
	12	....	*15°*	49	43	14	9
Octobre	12	Avant décintrement..................	*6°*	49	43	0	0
		Après décintrement..................	*6°*	56.5	50.7	7.5	7.7
	18	....	*3°*	60.5	55.2	4	4.5
	24	....	*6°*	65.6	60	5.1	4.8
	31	....	*0°*	69	62.5	3.4	2.5
Novembre	4	....	*6°*	70	63	1	0.5
	8	....	*12°*	71	65	1	2
	15	....	*6°*	74	70	3	5
	29	....	*- 1°*	80	76	6	6
1896							
Janvier	8	....	*- 3°*	b)83	b)80	3	4
Février	10	....	*+ 2°*	83	80	0	0

		amont	aval
Tassement total depuis le clavage jusqu'au 8 janvier 1896.	brut. *(b-a)*..........................	48mm	46mm
	en tenant compte de l'abaissement de température de 20° à - 3°............	33mm	31mm [2]

12. Épreuves. — Elles furent faites le 1er novembre 1895, 8 semaines après le clavage.

	Mouvements de la clef en mm — pendant l'épreuve — Relèvement ↑		Tassement ↓		permanent ↓
Rouleau vide, 3T 5....................	0mm1	rouleau sur le 1er 1/3 de la voûte	0mm6	au passage sur la clef	0mm1
Rouleau plein, 6T 5 (2 passages).........	0 1	»	0 9	id.	»
Charge uniforme de 300k m. q	»	»	0 6	»	»

2. — Au tassement moyen $\mathbf{t} = \frac{33^{mm} + 31^{mm}}{2} = 32^{mm}$ correspondrait un raccourcissement c de l'arc, donné par cette formule :

$$\mathbf{t} = \frac{c \times (2a')\,(\text{portée entre articulations})}{4\;b'\,(\text{montée entre articulations})} \qquad (S_1)$$

d'où :

$$c = 13^{mm}03$$

13. Dates.

		1895
Commencement des travaux		8 juillet
Grande voûte	Commencement	29 août
	Dernier clavage (joints de rupture)	7 septembre
	Décintrement	12 octobre
Achèvement des travaux		8 novembre
Ouverture à la circulation		12 novembre

14. Quantités.

Béton	Culées	262^{mc}	634^{mc}
	Voûte	164	
	Piliers	33	
	Plate-forme	40	
	Trottoirs	27	
	Parapets	6	
	Murs en retour	84	
	Remplissage	18	
Fonte pour rotules			15^{T}
Fer pour garde-corps			2^{T}

15. Personnel.

Ingénieur. — *Projet et Direction générale des Travaux :* M. Max Leibbrand, « Landesbaurath » à Sigmaringen.

Entrepreneurs : MM. B. Liebold et Cie, d'Holzminden.

Directeur de l'Entreprise : M. Jean Meyer, d'Holzminden.

SOURCES :

S_1. — Zeitschrift für Bauwesen, 1896, p. 279 à 292, Pl. 37 et 38 : « *Donaubrücke bei* « *Inzigkofen in Hohenzollern. — Betonbrücke mit offenen Gelenken* », Sigmaringen, janvier 1896. Max Leibbrand, Landesbaurath.

S_2. — Ce que j'ai vu, — août 1908.

Ce qui n'est pas spécifié S_2 est de S_1.

PONT SUR LE NECKAR, PRÈS DE LA GARE DE NECKARHAUSEN [1]

(ALLEMAGNE – Hohenzollern)

1899–1900 $\overline{A}^1$ 1re ($\geqslant 40^m$) [2]

Φ_1 (S_2)



I. Grande voûte. — C'est, comme celle d'Inzigkofen [2], un arc en béton à culées perdues, à 3 articulations apparentes.

La fibre moyenne est la courbe de pression sous le poids propre du pont : les épaisseurs de la voûte sont calculées pour une pression maxima de 40^k.

La largeur en douelle croît comme les ordonnées d'une parabole, de 4^m80 à la clef à 5^m60 aux retombées.

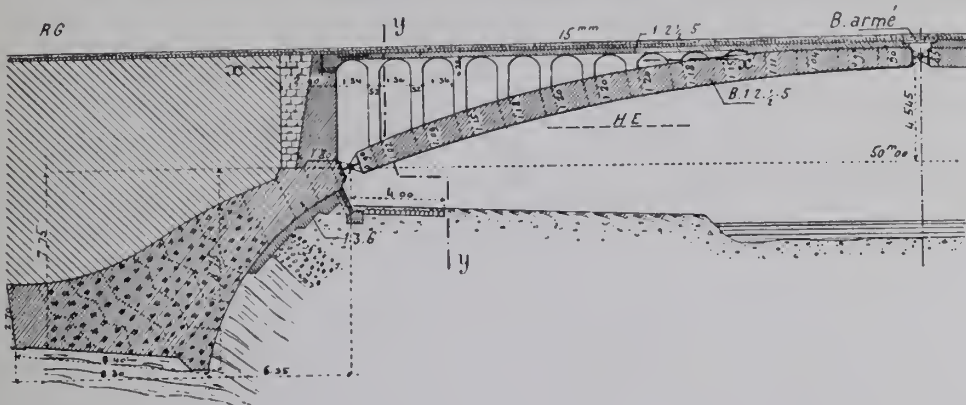
1. — Ligne de Stuttgart à Rottweil, à 73^{km} de Stuttgart.

2. — $\overline{A}^1$ 1re ($\geqslant 40^m$)^1, Tome IV, p. 225.

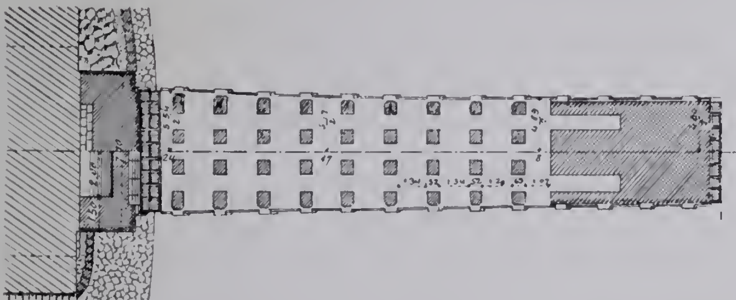
f₁ — Élévation — 2ᵐᵐ



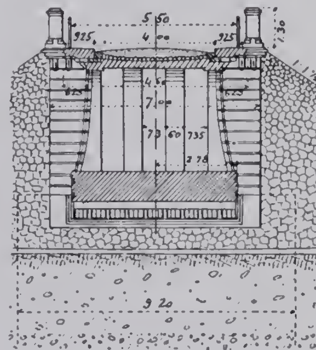
f₂ — Coupe en long — 3ᵐᵐ



f₃ — Coupe horizontale sur *xx* de f₂ — 3ᵐᵐ



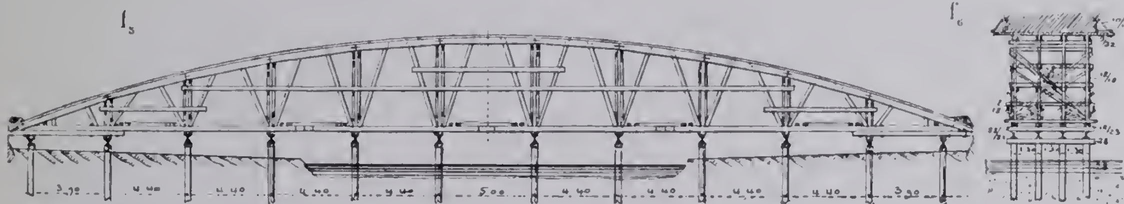
f₄ — Coupe en travers sur *yy* de f₂ — 4ᵐᵐ



Cintre — 2ᵐᵐ5

f₅

f₆

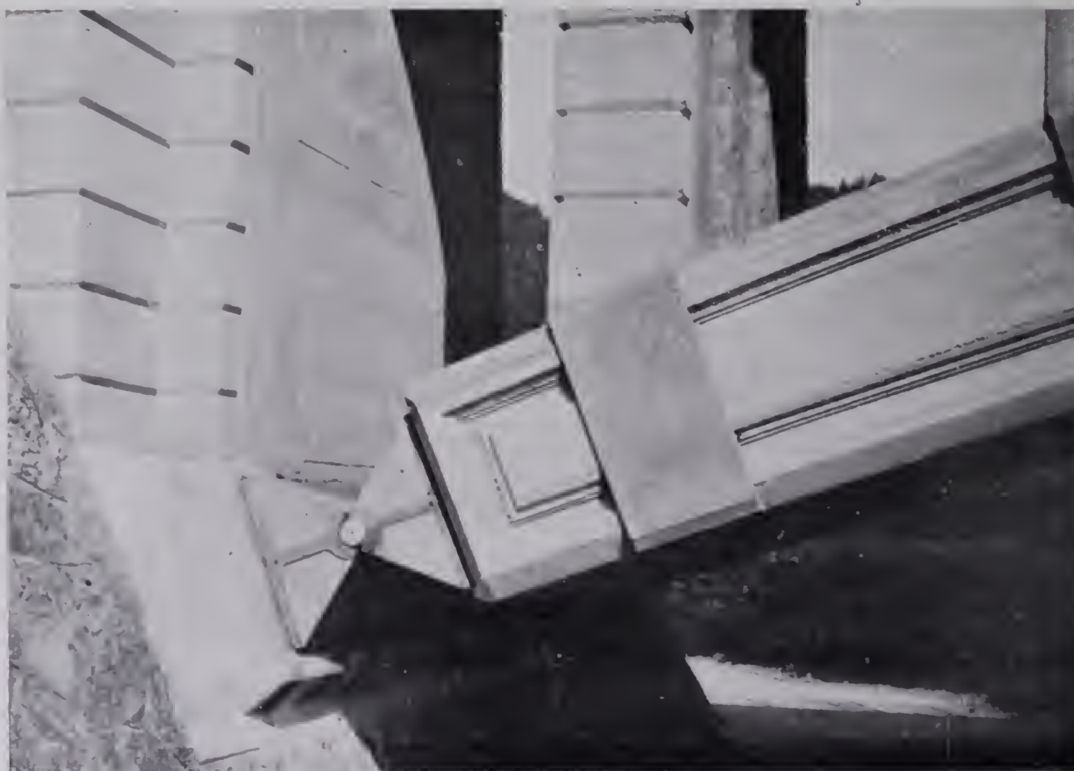


Articulations (S_2)

Φ_2 — Clef



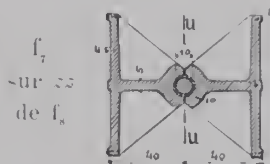
Φ_3 — Retombée



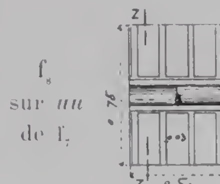
2. Articulations.

Coupes 2 m5

f_7 sur zz de f_8



f_8 sur *uu* de f_7



3. Joints de dilatation (f_2). — Comme au pont d'Inzigkofen[3].

4. Culées. — Le sol de fondation est une marne dolomitique résistant assez à la compression, peu au glissement.

Pour résister au renversement, on met les matériaux en profondeur.

Pour résister au glissement, on ne compte pas seulement sur le frottement proprement dit qui, lui, ne dépend que du poids de la culée et non de sa forme, mais, comme on l'a constaté sur un modèle en petit, sur une sorte de bourrelet qui butte le pied de la culée et augmente avec sa largeur : on l'a portée à 9m20 pour une largeur à la clef de 4m80.

5. Matériaux. — *A. - Ciment.* — Le ciment lent laissait un résidu de 1/1000 sur le tamis de 900 mailles, de 130/1000 sur le tamis de 4900 mailles.

B. - Mortier. — Voici le résultat des expériences faites au Laboratoire d'Essai de l'École Polytechnique de Stuttgart, par M. le Directeur von Bach :

Nombre de jours de prise	Résistance du mortier à 1/3 — à la traction — Sable normal	à la traction — Porphyre broyé	à la traction — Calcaire broyé	à la compression (Cubes de 7cm d'arête, à 10 % d'eau) — Sable normal	à la compression — Porphyre broyé
7 j	21k2	31k5	»	218k2	268k8
8	22,1	35,3	»	»	»
14	»	35,2	32k4	»	»
28	24,9	36,0	36,6	»	»
56	26,0	»	40,9	»	»
90	29,1	42,0	»	»	»

Le sable de broyage contient jusqu'à 1/4 de son volume de poussière. D'après les essais que voici, faits à l'usine de Blaubeuren, elle ne diminue pas la résistance :

Nombre de jours de prise	Résistance moyenne (Mortier à 1/3 de porphyre broyé) — à la traction — Sable lavé	à la traction — Sable non lavé	à la compression (Cubes de 5cm d'arête) — Sable lavé	à la compression — Sable non lavé
7 j	33k1	33k4	162k	162k
14	»	36,6	»	189
28	40,0	40,2	222	211
90	»	48,9	»	»

3. — A¹ rte (> 40m) 1, Tome IV, p. 225.

C. - *Béton (Dosages).*	Pour 1v de ciment		
	Sable	Gravier	Pierre cassée
Massif des fondations	3v	6v	»
Voûte	2v5	»	5v
Tablier sous chaussée	2v5	»	5v
Piliers des voûtes d'élégissement, murs en retour	3v	»	6v
Parements de tête	4v	»	»
Blocs moulés (plinthes, consoles, parapets)	2v	»	4v

On a employé 300 tonnes de ciment pour 1440mc de béton, soit en moyenne 208k de ciment par m. c. de béton en œuvre.

6. Efforts, en Kg $\overline{0^{m}01}^{2}$.

A. - Dans la voûte. — Pas de tension.

La compression varie entre 38k2 et 39k8, sauf sous les balanciers de fonte ; elle atteint là :

	à la clef	aux retombées
sans tenir compte du frottement des tourillons	54k6	46k2
en tenant compte de ce frottement, avec $f = 0.4$	64k	57k8

Les moments de flexion dans la voûte, dûs au frottement des tourillons, sont : positifs maxima à la clef; négatifs maxima aux retombées ; nuls aux joints de rupture.

B. - Dans les articulations. — Le travail maximum des balanciers à la flexion est :

Tension.......................... 221k3
Compression...................... 346k

Cette fonte résiste à 1735k à la traction.

C. - *Dans les culées.*	Pression maxima		Coefficient de frottement sur la base	
	Rive droite	Rive gauche	Rive droite	Rive gauche
Poids mort et crues	5k5	4k4	0,41	0,42
Surcharge complète	5,6	4,6	0,23	0.28
Ensemble	11k1	9k0		

7. Cintre.

— Pendant le bétonnage, les vérins se sont enfoncés de 3cm dans leurs semelles. La pression par $\overline{0^{m}01}^{2}$ était alors : sur les semelles inférieures, 80k ; sur les supérieures, 45k.

Pour les sauver, on a installé à côté des vérins, alors que la voûte était aux 2/3 bétonnée, des billots de bois qui arrêtèrent le tassement.

Au moment de décintrer, on les scia.

8. Fondations. — Le béton, fait à la machine, était pilonné par couches horizontales de 10^{cm} à 15^{cm}, derrière des cloisons normales à la courbe de pression : on les enlevait dès que le béton avait fait prise.

On posait 45^{mc} à 75^{mc} de béton par jour.

9. Exécution de la voûte. — On bétonna, à partir de la clef, par tranches symétriques, d'abord les tranches sous les piliers des voûtes d'élégissement.

Le béton des têtes était fait de pierres de différentes couleurs : on le pilonnait en même temps que le corps de la voûte, derrière des cloisons rabotées et huilées.

La voûte (270^{mc}) fut faite en 9 jours.

On clava d'abord aux articulations, puis aux joints de rupture.

On enleva les cloisons de tête 24 heures après le clavage. Les têtes furent vigoureusement lavées à la brosse : on put ainsi donner aux parements le grain de la pierre.

10. Décintrement. — On décintra 8 semaines après le clavage, après avoir posé les modillons et le couronnement qui est en béton moulé.

On tourna deux fois les vérins, en allant de la clef aux retombées, d'abord d'un 1/4 de tour, puis d'un 1/2 tour.

Il n'y a pas eu, aux retombées, de mouvements appréciables.

11. Tassements de la clef, en *mm.*

	Amont (Nord) Totaux	Amont (Nord) *Différences*	Aval (Sud) Totaux	Aval (Sud) *Différences*
1900				
25 juin (commencement du bétonnage de la voûte)...	0		0	
		57mm1		*67mm8*
3 juillet (clavage)........	57mm1		67mm8	
		9.6		*10.3*
28 août (décintrement) — matin..................	66.7		78.1	
		12.1		*12.5*
28 août (décintrement) — soir..................	78.8		90.6	
1901		*26.9*		*31.3*
1er avril....................................	105.7		121.9	
		— 13		*— 13*
3 juin	92.7		108.9	
1902		*20*		*29*
30 janvier..................................	112.7		137.9	
		— 16		*— 13*
21 mai......................................	96.7		124.9	

12. Épreuves. — Au passage d'un rouleau de $6^{T}5$, en octobre 1900, – de 16^{T}, en mai 1901, – la voûte fléchit de moins de 1^{mm}, puis revint à sa place.

13. Dates.

Projet	1896
Fondations..	automne 1899 (durée 3 mois)
Ouverture à la circulation..........................	23 octobre 1900

14. Quantités et Dépenses.

	Quantités	Dépenses totales	Dépenses par unité (m. c. ou 100k)
Fondations (béton des culées)	850mc	26.420f	31f08
Élévation (béton damé)	530mc	20.419f	38f52
Béton moulé	60mc	4.363f	72f71
Cloisons de tête		2.680f	
Cintre		6.125f	
Articulations (pose comprise)		6.848f	33f32
Garde-corps	4700k	2.964f	63f06
Asphalte. — Fers		1.571f	
Pont proprement dit		71.390f	
Accessoires. — Pont de service		9.426f	
Projet. — Direction des Travaux		5.984f	
Dépense totale		86.800f	

15. Personnel.

Directeur Général, *Projet et Exécution :* M. Max Leibbrand, « Landesbaurat » à Sigmaringen.

Ingénieurs (Regierungs-Baumeister) :

Projet : MM. Karl Bossert et Adolf Göller.

Vérification des Calculs, Direction des Travaux : M. Friedrich Probst.

Entrepreneurs : MM. Waiss et Freytag, de Neustadt-sur-Haardt.

Directeur de l'Entreprise : M. Rössle, « Regierungs-Baumeister ».

SOURCES :

S_1. — Zeitschrift für Bauwesen, 1903, p. 455 à 476, Pl. 54 et 55 : « *Die Neckarbrücke bei* « *Neckarhausen (Hohenzollern)* », Max Leibbrand, Landesbaurat à Sigmaringen, 20 août 1902.

S_2. — Ce que j'ai vu — août 1908.

PONT DU PRINCE-RÉGENT

SUR L'ISAR, A **MUNICH** *(BAVIÈRE)*

Prinzregenten Strasse

1900–1901 $\bar{A}^1$ r^{le} (40m,3

Φ_1 (S_3)

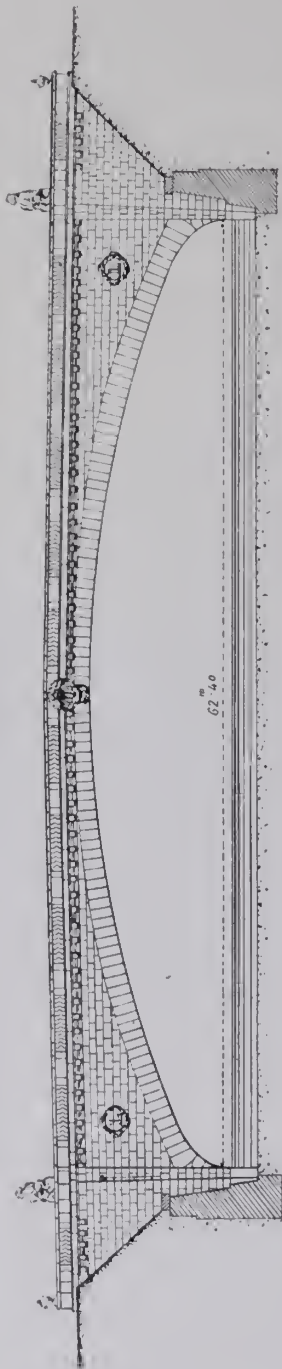


1. Aspect. — La voûte est jetée entre deux grands terre-pleins; elle conduit au monument de la Paix, élevé sur la rive droite de l'Isar.

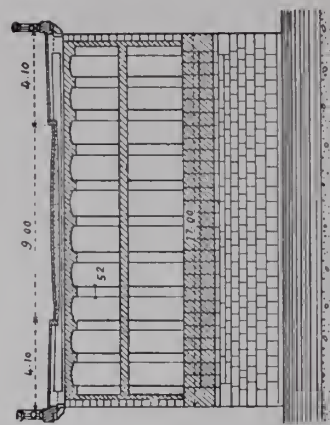
Le Pont devait être, et a été, traité avec luxe.

2. Culées. — La courbe de pression coupe la base dans le 1/3 central, sous un angle de 72°.

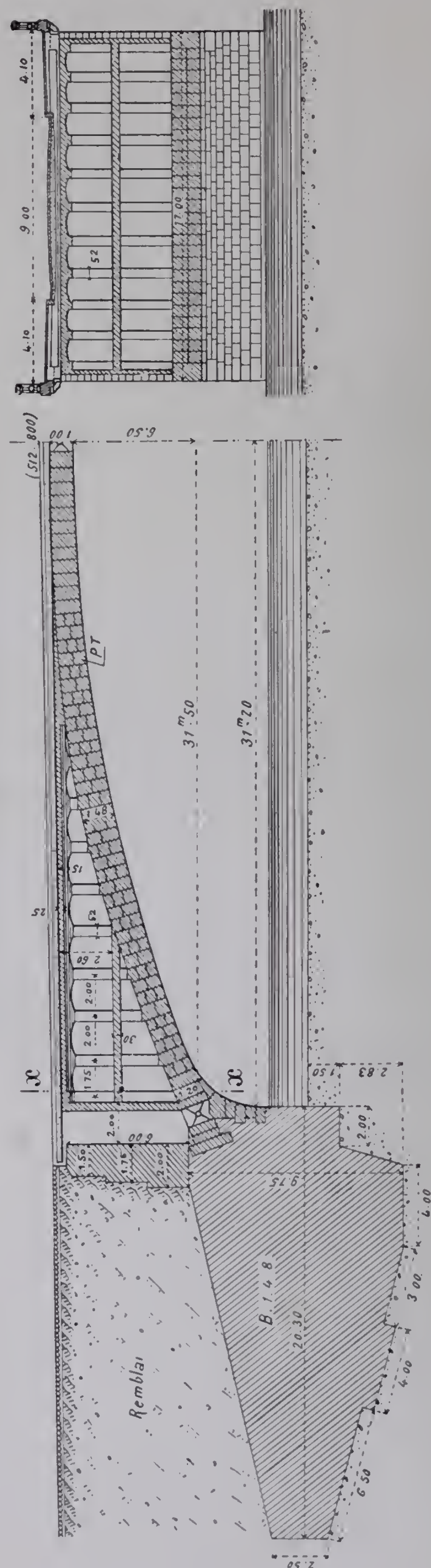
Les culées sont de 20m plus larges que le pont.



f₁ — Élévation — 2mm



f₂ — Coupe en travers sur xx de f₂ — 3mm



f — Demi-coupe en long — 3mm

Articulation de clef, masquée ensuite (S_1)

Φ_4 — Vue de côté



Φ_3 — Vue par-dessus



3. Fondations. — La marne[1] avait été reconnue par des sondages poussés à 27m.

On déblaya dans chaque fouille 10.000mc.

Le béton à 1v-4v-8v (S''_2), posé jour et nuit sans interruption, était pilonné par minces couches, normales à la courbe de pression.

En 9 à 10 jours, on bétonna les deux culées (5400mc environ).

4. Personnel.

Projet et Entreprise : MM. Sager et Wœrner, de Munich.

Collaborateurs techniques : MM. Bernard Wœrner et Jean Grüb, Ingénieurs.

Direction des Travaux : M. H. Sœrgel, Ingénieur en chef au Ministère de l'Intérieur ; — M. Jules Klein, Ingénieur.

Architecture : M. le Professeur Théodore Fischer.

1. — « *Merglicher Flinz* ».

SOURCES :

S_1. — Album publié par MM. Sager et Wœrner : « *Prinzregenten Brücke, - München* ».

S_2. — Dessins d'exécution (S'_2) et renseignements (S''_2) que m'ont gracieusement communiqués MM. Sager et Wœrner.

S_3. — Ce que j'ai vu — août 1908.

Ce qui n'est pas spécifié S_2 ou S_3 est de S_1.

PONT MAX-JOSEPH, SUR L'ISAR, A MUNICH

Entre le Jardin anglais et le Faubourg de Bogenhausen

1901-1902 $\overline{A}^1$ I^{de} $(> 40^m)^4$

Φ_4 (S_4)



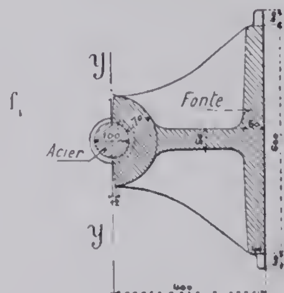
1. Matériaux. — La grande voûte et les têtes sont en pierre de taille ; le reste, en béton de gravier (S''_2).

2. Articulations (S'_1).

Coupes — 5^{cm}

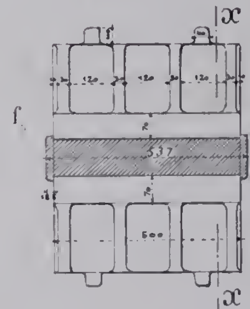
sur xx de f_5

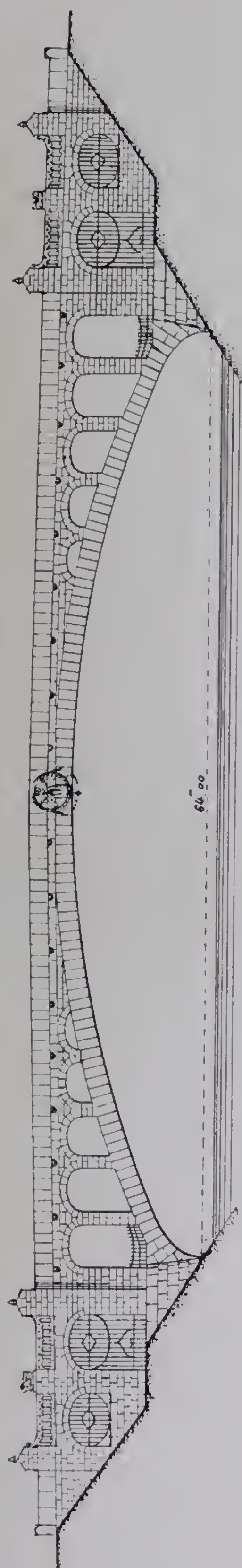
f_1



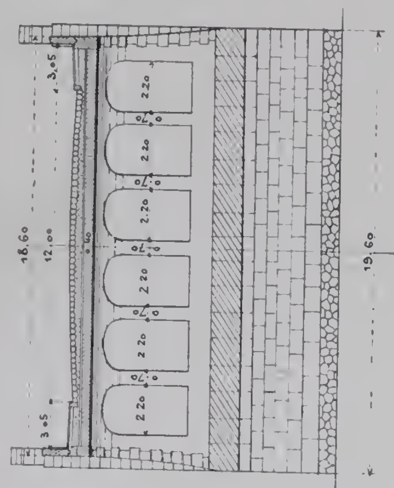
sur yy de f_1

f_1

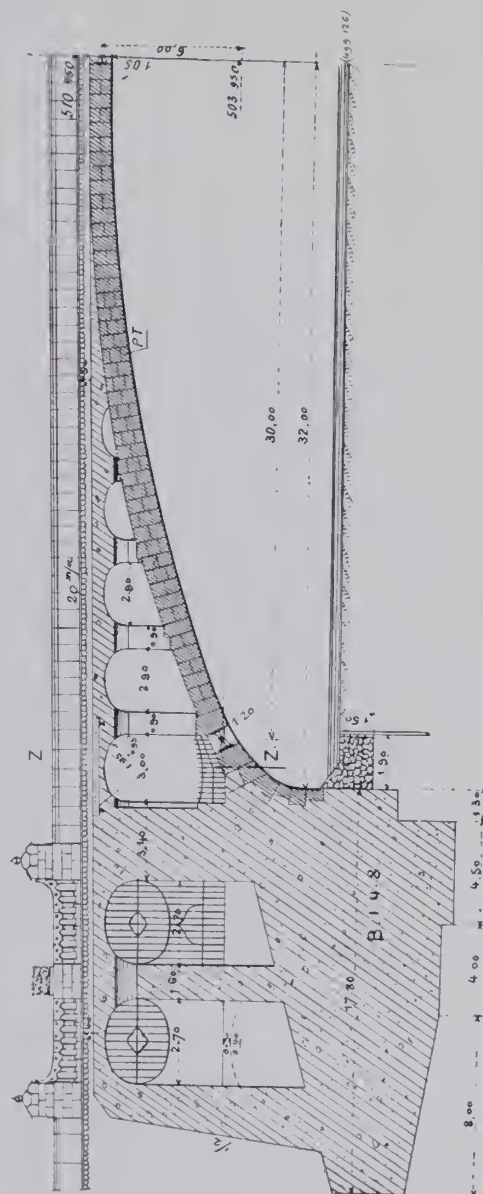




f$_1$ — Élévation — 2^{mm}

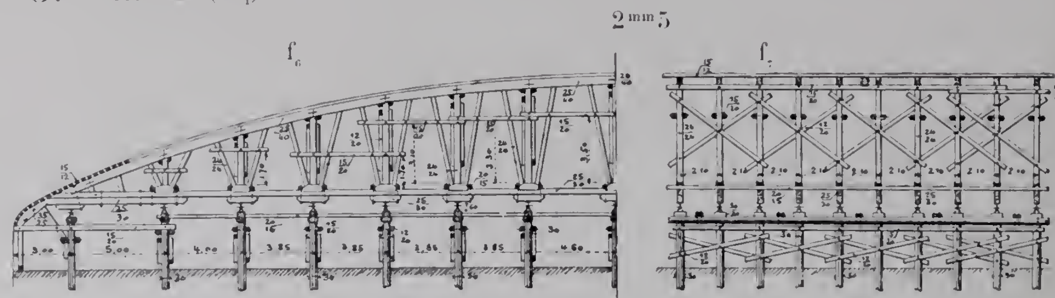


f$_3$ — Coupe en travers sur zz de f$_2$ — 3^{mm}



f$_2$ — Demi-coupe en long — 3^{mm}

3. Cintre (S'_1).



4. Ouvriers. — On y a occupé jusqu'à 600 ouvriers (S_3).

5. Dates (S''_1, S''_2).

Commencement des travaux	4 novembre 1901
Fondations	décembre 1901 - mars 1902
Grande voûte	24 avril - 14 mai 1902
Ouverture à la circulation	août 1902

6. Personnel.

Projet et Entreprise : MM. Sager et Wœrner, de Munich.
Direction des Travaux : M. Schwiening, Directeur des Travaux de la Ville.

SOURCES :

S_1. — Dessins (S'_1) et renseignements (S''_1) gracieusement communiqués par M. Schwiening.

S_2. — Dessins d'exécution (S'_2) et renseignements (S''_2) qu'ont bien voulu me donner MM. Sager et Wœrner.

S_3. — Centralblatt der Bauverwaltung, 30 août 1902, p. 427 : « *Die Max-Joseph Brücke* « *in München* » A. Kling.

S_4. — Ce que j'ai vu — août 1908.

TABLEAU SYNOPTIQUE GÉNÉRAL

DES PONTS AYANT DES VOÛTES ⩾ 40^{M}

SEMI-ARTICULÉES

OU

ARTICULÉES

CLASSÉS PAR :

TYPE ET MATIÈRE DES ARTICULATIONS,

INTRADOS, NOMBRE D'ARCHES, VOIE PORTÉE,

MATÉRIAUX DES VOÛTES

VOÛTES SEMI-ARTICULÉES[1] ≥ 40m

Toutes ces voûtes sont à ciment.

Après la date on a indiqué la portée entre culées, puis, *en italique*, entre ( ), la portée entre rotules.

	ARCS TRÈS SURBAISSÉS — UNE SEULE GRANDE ARCHE — SOUS ROUTE $\overline{A}^1$ Rte — EN BÉTON	EN MAÇONNERIE APPAREILLÉE	SOUS CHins DE FER A VOIE NORMALE $\overline{A}^1$ Fr — EN PIERRE DE TAILLE	PLUSIEURS Gdes ARCHES — SOUS ROUTE $\overline{A}^n$ Rte — EN BÉTON	Plus grande portée — totale	Plus grande portée — entre articulations	Nombre — d'ouvrages	Nombre — de voûtes ≥ 40m
ARTICULATIONS — SUR PLOMB		Höfen[2] 1885 - 41m - *(28m)* Marbach[3] 18 86/87 - 43m50 - *(32m)* Baiersbronn[2] 1889 - 40m - *(33m)*			43m50	*33m*	3	[illegible]
ARTICULATIONS — A GENOU — Rotules d'acier prises dans des caissons en tôle	Munderkingen 1893 - 59m - *(50m)*		Morbegno 19 02/03 - 70m - *(66m)*	Coulouvrenière 18 95/96 - 2 × 40m - *(40m)*	70m	*66m*	3	[illegible]
ARTICULATIONS — ROULANTES — EN PIERRE								
ARTICULATIONS — ROULANTES — EN PIERRE								
ARTICULATIONS — ROULANTES — EN BÉTON MOULÉ								
ARTICULATIONS — ROULANTES — EN BÉTON ARMÉ								
ARTICULATIONS — ROULANTES — EN ACIER — Rotules d'acier prises dans des sabots en fonte								
ARTICULATIONS — ROULANTES — EN ACIER — Rotules tout entières en acier moulé								
ARTICULATIONS — TOURNANTES								

Plus grande portée	totale	59m (Munderkingen)	43m50 (Marbach)	70m (Morbegno)	40m (Coulouvrenière)	70m	
Plus grande portée	entre articulations	*50m* (Munderkingen)	*33m* (Baiersbronn)	*66m* (Morbegno)	*40m* (Coulouvrenière)		*66m*
Nombre	d'ouvrages	1	3	1	1		6
Nombre	de voûtes ≥ 40m	1	3	1	2		

1. — Pour la définition des voûtes semi articulées, voir Tome IV, Livre I, p. 28.
2. — En PT*.
3. — Bandeaux en PT*, corps en MEV*.

VOÛTES ARTICULÉES ⩾ 40m

LLIPSES E — LUSIEURS ES ARCHES — SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE — E^n Fr EN BÉTON	ARCS PEU SURBAISSÉS $\widehat{A}$ — UNE SEULE Gde ARCHE — SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE — $\widehat{A}^1$ Fr EN BÉTON	ARCS ASSEZ SURBAISSÉS $\widehat{A}$ — UNE SEULE Gde ARCHE SOUS ROUTE — $\widehat{A}^1$ rte EN BÉTON	ARCS TRÈS SURBAISSÉS $\widehat{A}$ — UNE SEULE GRANDE ARCHE — SOUS ROUTE $\widehat{A}^1$ rte — EN BÉTON	UNE SEULE GRANDE ARCHE — SOUS ROUTE $\widehat{A}^1$ rte — EN MAÇONNERIE APPAREILLÉE	UNE SEULE GRANDE ARCHE — SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE $\widehat{A}^1$ Fr — EN BÉTON	PLUSIEURS Gdes ARCHES — SOUS ROUTE $\widehat{A}^n$ rte — EN BÉTON	PLUSIEURS Gdes ARCHES — SOUS ROUTE $\widehat{A}^n$ rte — EN PIERRE DE TAILLE	Plus grande portée — totale	Plus grande portée — entre articulations	Nombre — d'ouvrages	Nombre — de voûtes ⩾ 40m
Garching 19 07/08 35 - (38m55)								44m35 Garching	38m55	1	1
Chemnitz 898/900 - 43m10			Grasdorf 1899/1900 40m - (40m39)	Göhren [4] 19 03/04 60m - (60m56)		Hochberg 19 01/03 2 × 39m40 - (40m)		60m Göhren	60m56	4	5
						Neckargartach 19 03/05 5 × 40m - (40m)		40m Neckargartach	40m	1	5
						Malling 1899/1901 - 3 × 40m (40m50), Moulins-lez-Metz 19 04/05 - 2 × 40m - 44m (40m51) (44m70)		44m Moulins-lez-Metz	44m70	2	6
		Gräveneck 19 11/12 - 48m (48m425)						48m Gräveneck	48m425	1	1
			Élise [6] 19 06/07 47m50 - (43m50)			Reichenbach [6] 19 02/03 - 44m - (44m); Wittelsbach [6] 19 04/05 - 44m - (44m)	Cornélius 19 02/03 - 44m - (44m); Maximilien 19 03/05 - 2 × 45m87 (44m)	47m50 Élise	44m Maximilien	5	6
	Kempten 1906 64m50 - (50m60) 63m80 - (50m60)		Wallstrasse 19 04/05 65m45 - (57m)		Illerbeuren 19 03/04 - 59m (57m164)	Mannheim [6] 19 05/08 - 2 × 59m50 (58m50)		65m45 Wallstrasse	58m50 Mannheim	6	6
			Inzigkofen 1895-47m90-(43m); Neckarhausen 1899/1900-59m40-(50m)	Prince-Régent [5] 19 00/01 - 62m40 - (63m); Max-Joseph [5] 19 01/02 - 64m - (60m)				64m Max-Joseph	63m Prince-Régent	4	4
m35 Garching / m55	64m50 Kempten / 50m60	48m Gräveneck / 48m425	65m45 Wallstrasse / 57m	64m Max-Joseph / 63m Prince-Régent	59m Illerbeuren / 57m164	59m50 Mannheim / 58m50	45m87 Maximilien / 44m	65m45 Wallstrasse	m 63 Prince-Régent		
2	3	1	5	3	1	7	2			24	
2	3	1	5	3	1	16	3				34

En MOV*. 5. — En PT*. 6. — Bandeaux en PT*; corps en B*. 7. — Bandeaux en MEV*; corps en B*. *. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, p. 1, n° 6.

VOÛTE ARTICULÉE

QU'ON AURAIT, A TORT, CHERCHÉE

DANS LES SÉRIES DU LIVRE II [1]

Comme on l'a fait pour les voûtes inarticulées [2], on décrit sommairement ici une voûte articulée en béton peu armé, qu'on aurait pu chercher dans les séries du Livre II.

1. — La « Revista de Obras Públicas » du 25 avril 1901 décrit un pont en béton à 3 articulations de 50^{m} de portée, $4^{m}50$ de flèche, sur le Rio Nalón, pour la route d'Oviedo à Pola de Lena (Asturies), près de la station de Las Segadas, projeté par M. Eugenio Ribera, Ingénieur au Corps des Ponts, Chaussées et Ports.

Ce projet avait été approuvé, mais l'Entrepreneur général de la Route obtint d'y substituer un pont en fer *.

Il a été indiqué comme exécuté dans quelques périodiques techniques.

* Renseignement gracieusement donné par M. Ribera, — mars 1907.

2. — Tome III, p. 283.

PONT Date - Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	PROJET							
	ENSEMBLE		GRANDE VOÛTE					
	Longueur *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la voie au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la voie portée sur l'extrados	INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons de courbure : à la clef aux naissances*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Joints de rupture* Retombées	COMMENT SONT ARMÉES LES VOÛTES — ROTULES	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg / $\overline{0^{m}01}^{2}$ Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Sigmaringen** *Hohenzollern* 1907–1909 *Arc assez surbaissé, à 3 articulations tournantes, sous chemin de fer à voie normale*	*$60^{m}50$* $23^{mm}2$ $12^{m}53$	$4^{m}30$ à $4^{m}97$ *$4^{m}00$ à $6^{m}70$ à cause de la courbe* Fruit courbe $0^{m}725$	Courbe d'intrados d'après la courbe de pression Au-dessus des naissances : $41^{m},60$ *$13^{m}245$* $\frac{1}{3,14} = 0,318$ *$28^{m}40$* *$9^{m}00$* Entre axes des rotules : $32^{m},00$ *$5^{m}562$* $\frac{1}{5,753} = 0,173$	Corps : $1^{m},25$ *$1^{m}25$* $1^{m}06$ Têtes : $1^{m},20$ *$1^{m}20$* $1^{m}06$	Fers ronds, en long et en travers, au cerveau à l'intrados, aux reins à l'extrados, au-dessous des rotules — Tourillons en acier Diamètre : 55^{mm} Balanciers en fonte Pression maxima : sur les tourillons 585^{k} sur les sommiers en béton 56^{k}	Béton Corps de la voûte : Ciment . . . . 1^{v} Sable . . . . 3^{v} Gravier . . . . 4^{v} Sommiers des articulations : Ciment . . . . 1^{v} Sable . . . . $1^{v}5$ Pierre cassée . . $2^{v}5$	Pression avec surcharge : MAX. / MOY. Clef : $13^{k}8$ Joints de rupture : $23^{k}1$ / $13^{k}2$ Retombées : $10^{k}3$ / $5^{k}9$ 6200^{k} $1^{mc^{1}}$	1° Plate-forme en béton armé sur piles en béton de 70^{c} à 90 espacées de $2^{m}75$ à $3^{m}80$ traversées par un couloir de $0^{m}80$. 2° »

1 — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, page II, n° 6.

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg : $0^{m}01^{2}$ *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] { de volume « utile » W [4].
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Rive gauche :	Fixe							
Rocher et Gravier		4	»	»	A pleine épaisseur	Piles sur la voûte construites	t_c = 24mm	Q = 1 050mc
		22cm						
— 4m75	Montants et contrefiches	1m24 à 2m08	4000k	13k4	Tranches isolées de 1m à 1m50		t'_v = 7mm	Q : S_p = 3mc49 Q : W = 0mc29
»			14808f	49f6		*2 mois environ*	t''_v = 2mm1	
—								D = 92 550f
Rive droite :	*Pin*							D : S_p = 307f8
Gravier		*80mm*				20 octobre		D : W = 25f2 D : Q = 88f1
— 3m50	Vérins à vis							
Épuisements dans des batardeaux								

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTE ARTICULÉE 40m EN BÉTON PEU ARMÉ

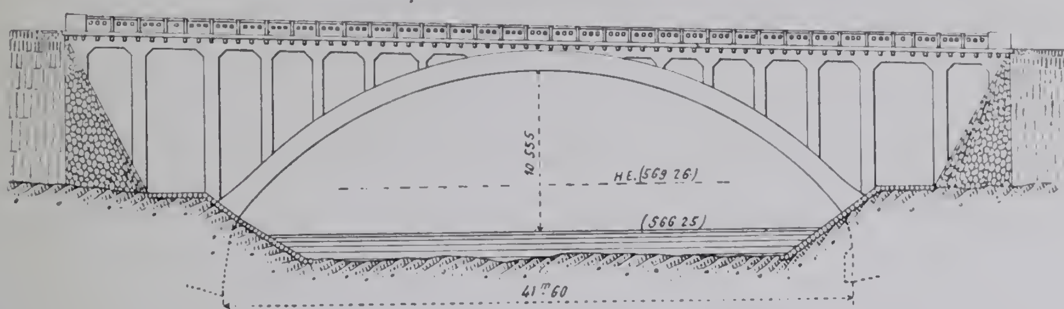
MONOGRAPHIE

PONT SUR LE DANUBE, A SIGMARINGEN *(ALLEMAGNE, - Hohenzollern)*

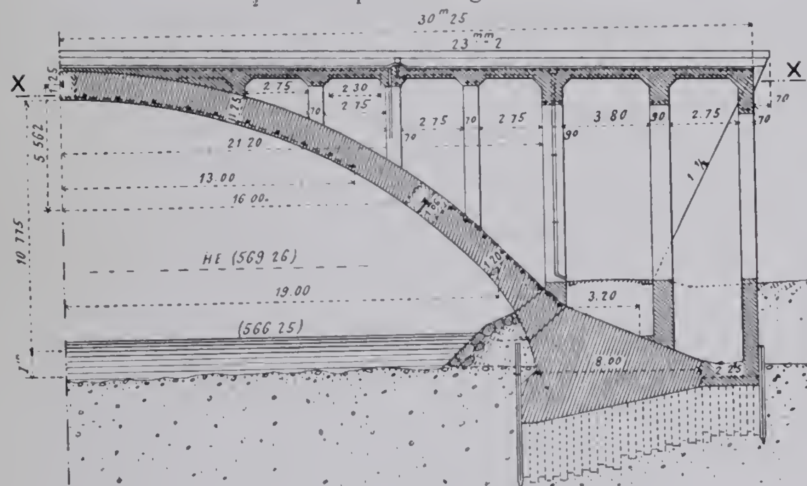
Ligne de Sigmaringen à Gammertingen[1]

1907-1909

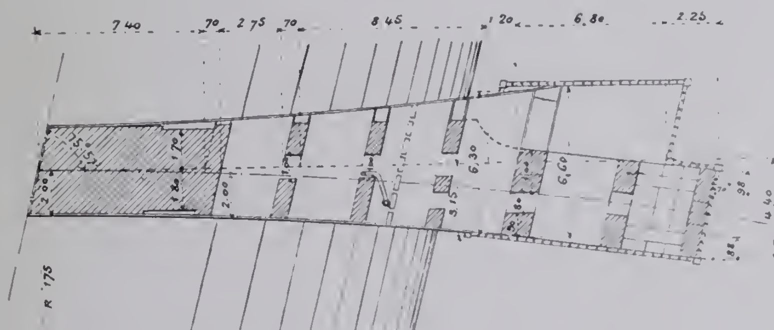
f_1 — Élévation — 2mm



f_2 — Coupe en long — 3mm



f_3 — Coupe horizontale sur *xx* de f_2 — 3mm



1. Tracé de la voie. — Elle est en rampe de 1/42, en courbe de 175m, à 75°57' sur le courant.

1. — Au Pt 4H + 61m50.

Φ_1 (S'''_1)

2. Articulations (f_4 à f_7). — Dans ce pont biais, on pouvait craindre un déplacement transversal d'un des deux balanciers C_1, C_2 par rapport à l'autre.

Articulations — 10cm

f_4 — Vue sur *xx* de f_5

f_5 — Vue sur *yy* de f_4

f_6 — Coupe sur *zz* de f_7

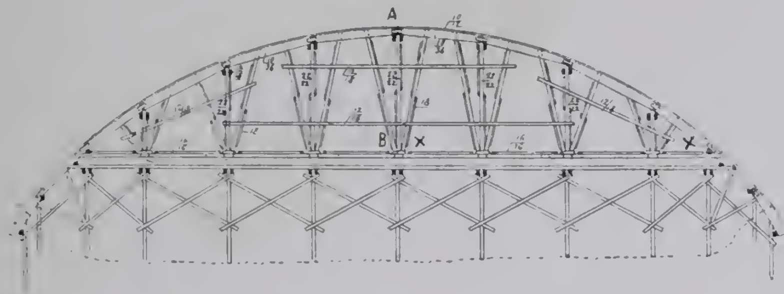
f_7 — Vue sur *uu* de f_6

Pour le prévenir, voici l'ingénieux dispositif[2] imaginé par M. Max Leibbrand : Les balanciers portent deux joues J_1, J_2.

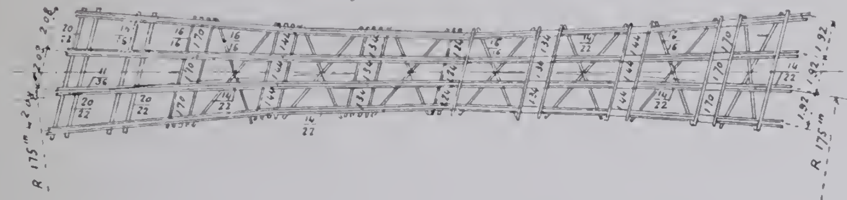
Pendant qu'on met en place les rotules, on solidarise les joues en passant les boulons *b* (f_4, f_5) par les trous O_1, O_2 (f_6).

3. Cintre.

f_8 — Élévation — 2mm5



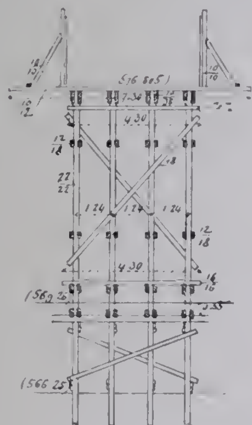
f_9 — Plan — 2mm5



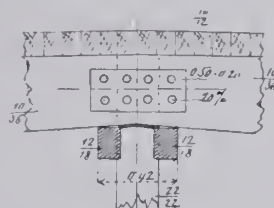
Détails — 2mm5

Nœud A de f_8

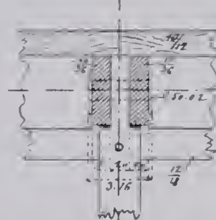
f_{10} — Coupe en travers — 4mm



f_{11} — Élévation

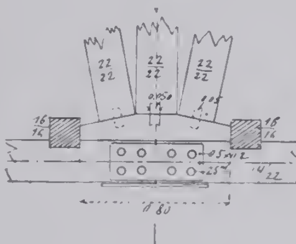


f_{12} — Coupe en travers

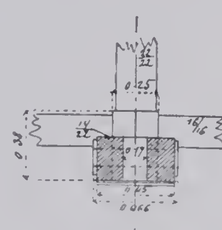


Nœud B de f_8

f_{13} — Élévation



f_{14} — Coupe en travers



2. — Dispositif breveté — M. Leibbrand a bien voulu m'autoriser à le décrire ici.

4. Dates (S''₁).

Culées	automne 1907 printemps 1908
Grande voûte	été 1908
Décintrement	20 octobre 1908
Ouverture à la circulation	printemps 1909

5. Personnel (S''₁).

Projet et Direction des Travaux : M. Max Leibbrand, Geheimer Baurat.
Direction Générale des Travaux : M. Rühle, Regierungsbaumeister ;
M. Leibbrand[3], Geheimer Baurat.
Entreprise : Westdeutsche Eisenbahngesellschaft.

3. — Père de M. Max Leibbrand (S''₁).

SOURCE :

S_1. — Dessins d'exécution (S'_1), renseignements (S''_1) et photographie (S'''_1), gracieusement communiqués par M. Max Leibbrand, en 1909.

LIVRE III

CE QUE L'EXPÉRIENCE ENSEIGNE DE SPÉCIAL AUX VOÛTES ARTICULÉES

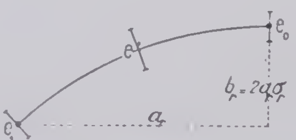
TITRE I

DISPOSITIONS — DIMENSIONS

AVANTAGES — INCONVÉNIENTS

DE

CHAQUE TYPE D'ARTICULATION



ARTICULATIONS SUR PLOMB

Art. 1. — Épaisseurs et Matériaux des voûtes. — Dimensions et Travail des Bandes de Plomb — TABLEAU SYNOPTIQUE

Date	Ponts (On a souligné ceux sous rails)	Pays	Intrados: Rang dans les séries ⩾ 40m	Voûte: Portée totale $2a$	Entre articulations: Portée $2a_r$	Entre articulations: Surbaissement σ_r	Épaisseurs en 0m01: à la clef e_0	Épaisseurs: aux joints de rupture e'	Épaisseurs: aux retombées e_1	Matériaux: Bandeaux	Matériaux: Douelle et Queutage	Matériaux: Sommiers	Bandes de plomb: Largeur dans le sens du joint en 0m01: Clef j_0	Largeur: Retombées j_1	Rapports: $\frac{j_0}{e_0}$	Rapports: $\frac{j_1}{e_1}$	Épaisseur en 0m01	Pression étalée sur toute la largeur de la bande kg/0m01²
	A. – *Voûtes semi-articulées*																	
1885	de **Höfen**, sur l'Enz.	Wurtemberg	$\overline{\text{A}}^1$ r^te (⩾ 40m)[1]	41m	28m	1/10	100cm		150cm		PT¹ — Grès		35cm	50cm	*0.35*	*0.33*		60k
1886	de **Wildbad**[2], sur l'Enz.		»	22.60	15.60	1/4.8	50		80		PT¹ — Grès		20	20	*0.40*	*0.25*	20mm	46
1886	de **Neuneck**[2], sur la Glatt.		»	23	17	1/5.66	40		80		PT¹ — Grès		10	20	*0.25*	*0.25*		36
18 86/87	de **Marbach**, sur la Murr.		$\overline{\text{A}}^1$ r^te (⩾ 40m)[2]	43.50	32	1/10.32	120		150	PT¹ Keuper	MEV¹ Muschelkalk	PT¹ Grès	40	50	*0.33*	*0.33*	22mm	55
1889	de **Baiersbronn**, sur la Murg.		$\overline{\text{A}}^1$ r^te (⩾ 40m)[3]	40	33	1/10	60		80		PT¹ — Grès		17	18	*0.28*	*0.22*		115
1890	de **Baiersbronn**[3], sur la Forbach.		$\overline{\text{A}}^1$ r^te	32	25	1/8.33	60		80		PT¹ — Grès		11	13	*0.18*	*0.16*		102
1891	d'**Ehingen**[3] (Passage supér^r).		$\widehat{\text{A}}^1$ r^te	23	18	1/5	45		100	PT¹ Calcaire	B¹ - 1^v, 2^v, 6^v	B¹ - 1^v, 2^v, 4^v	10	10	*0.22*	*0.10*		61
1892	de **Rechtenstein**[4], sur le Danube.		$\overline{\text{A}}^2$ r^te	23	23	1/9.2	65	73	90	PT¹ Calcaire	B¹ - 1^v, 2^v5, 5^v + 1/8 pierres	B¹ - 1^v, 2^v, 4^v	18	20	*0.276*	*0.222*		60
1895	de **Mühlheim**[3], sur le Neckar.		$\overline{\text{A}}$ r^te	29.20	22	1/10	45		60 / 65	PT¹	B¹ - 1^v, 2^v5, 5^v	B¹ - 1^v, 2^v5, 5^v	9.3	10.6	*0.206*	*0.176* / *0.192*	20mm	100
1895	sur le **Lein**[3].		»	29.60	23.10	1/6.6	50		80		B¹ — 1^v, 2^v5, 5^v		12	15	*0.24*	*0.188*		66
18 95/96	de **Gemmrigheim**[5], sur le Neckar.		$\widehat{\text{A}}^1$ r^te	38	38	1/6.9	80		90		B¹ — 1^v, 2^v5, 5^v		15	18	*0.188*	*0.20*		111
18 97/98	d'**Ehingen**[6], sur le Danube.		»	2 de 21 / 20			70			B¹ - 1^v, 2^v5, 5^v	B¹ - 1^v, 2^v5, 5^v	B¹ - 1^v, 2, 4^v	15		*0.214*			83
19 07/09	de la <u>**Vieille-Route**</u>, à **Lichtensteig**[7]	S[illegible]	$\widehat{\text{A}}^1$ r^te	18.50	18.50	1/5.3	90		90	MEV¹	MOV¹	MOV¹	15	20	*0.166*	*0.222*		

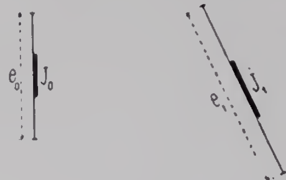
B. — Voûtes articulées de façon permanente

18 97/98	de **Miltenberg**[8], sur le Mein	Bavière	$\overline{A}^6$ r^te	31m15	30-60	1/8.93	70cm	90cm	80cm	MOV[1] - Grès	MOV[1] - Grès	PT[1] - Grès	13m	14m5	0.18	0.16	20mm	
				32.70			70	92	80				13	14.5	0.18	0.16		
				34.20			70	93	80				13.5	15	0.19	0.19		
				34.20			70	98	80				12.5	14.5	0.17	0.16		
				32.70			75	88	85				10.5	13	0.14	0.15		
				31.20	30.64	1/6.24	75	80	85				9.5	11.5	0.13	0.13		
19 01/02	sur l'**Oued Dar-el-Oued**[9]	Algérie, Constantine	C[3] r^te	25	21.65	1/3.464	70		110	MAV[1] - Calcaire dur (Chaux 350k)		PT[1]			0.33	0.33	16	
	sur l'**Oued Amacin**[9]		$\widehat{A}^1$ r^te	27	27	1/6	85		110	MAV[1] - Calcaire dur (Ciment 450k)		PT[1]			0.33	0.33	17	
19 02/03	de **Reichenbach**, sur l'Isar, à Munich (*Arches rive droite*)	Bavière	$\overline{A}^n$ r^te ($\geqslant$ 40m)[4]	28			70		80	PT[1] Muschelkalk	B[1] - 1v, 2v5, 5v	PT[1] - Granit	20	20	0.285	0.25	5	
				27			70		80									
				26			70		80									
19 05/06	sur l'**Oued Djemaa**[9]	Algérie, Constantine	E[3] r^te	29.43	27	1/6	90		115	MAV[1] - Grès dur (Ciment 450k)		PT[1]			0.33	0.33	21	
1906	de **Kempten**, sur l'Iller (*Arches latérales*)	Bavière	$\widehat{A}^1$ F^r ($\geqslant$ 40m)[1,2,3]	21.60	17.648	1/3.426	70		115.5	B[1] - 1v, 3v, 6v	B[1] - 1v, 3v, 6v	B[1] - 1v, 2v, 2v	35	57	0.50	0.50	8	48k
19 07/08	d'**Altwasser**, sur le Danube, à **Neubourg**[10]	Bavière	$\overline{A}^3$ r^te	23.72	22	1/8.3 et 1/9.3	52	64	60	PT[1] Muschelkalk	B[1]							
19 07/08	de **Garching** sur l'Alz — Ligne de Mühldorf à Freilassing	Bavière	E[n] F^r ($\geqslant$ 40m)[1]	44.35	38.55	1/5.33	110		175	B[1] - 1v, 2v5, 5v	B[1] - 1v, 2v5, 5v	B[1] - 1v, 2v, 2v	38	83	0.315	0.471	8	80
				33.95	28.90	1/5.43	90		145				»	»	»	»	»	»
				33.89	28.90	1/5.43	90		145				»	»	»	»	»	»
	de **Mühlbach**[11] — Ligne de Mühldorf à Freilassing	Bavière		33.42	29.70													
	de **Halden**[12], sur la Lenne, (*Arches latérales*)	Westphalie			18.50	1/10	50		65	B[1] - 1v, 4v, 6v	B[1] - 1v, 4v, 6v	B[1] - 1v, 6v	20	20	0.10	0.307	20	
19 07/08	de **Durbuy**[13], sur l'Ourthe	Luxembourg belge	$\overline{A}^1$ r^te		33	1/10	100		150	PT[1] « Petit Granit »			30	50	0.33	0.33		
19 11/12	entre **Ulm** et **Neu-Ulm**[14], sur le Danube	Wurtemberg	$\overline{A}^3$ r^te		28.50	1/7.05												
					27	1/7.5												

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, page II, n° 6.
2. — Karl von Leibbrand. « *Gewölbte Brücken* », Leipzig, 1897, p. 50.
3. — *Loc. cit.*, *renvoi 2*, p. 66.
4. — Zeitschrift für Bauwesen, 1893, p. 439 à 446, Pl. 50. « *Die Betonbrücke über die Donau bei Rechtenstein (Württemberg)* », von Braun, Kgl. Strassen-Bauinspector in Ehingen.
5. — Zeitschrift für Architektur und Ingenieurwesen, 10 septembre 1897, p. 439 à 444. « *Betonbrücke über den Neckar zwischen Kirchheim und Gemmrigheim* » Präsident von Leibbrand.
6. — Zentralblatt der Bauverwaltung, 1901, p. 506 et 521. — Le plomb était posé dans le béton frais.
7. — Dessins d'exécution, gracieusement communiqués par M. Acatos, Ingénieur en chef du Bodensee-Toggenburgbahn.
8. — Zeitschrift für Bauwesen, 1900, p. 207 à 240, Pl. 35.
9. — Renseignements gracieusement donnés par M. Boisnier, Ingénieur en chef à Constantine.
10. — Dessins d'exécution } qu'ont bien voulu me donner MM. Sager et Wœrner, de Munich.
11. — Renseignements }
12. — Deutsche Bauzeitung, 1905 — Mitteilungen über Zement-, Beton-, und Eisenbetonbau, n° 12, p. 45, 46. — Le plomb était posé dans le béton frais. — A l'arche centrale, les articulations sont en béton.
13. — Annales des Travaux publics de Belgique, 1910, p. 799 à 820.
14. — Beton und Eisen, 1912, Heft II, p. 35. « *Neue Strassenbrücke über die Donau zwischen Ulm und Neu-Ulm.* Dr Ing. A. Kleinlogel. Darmstadt.

Art. 2. — Dimensions des bandes de plomb, d'après le tableau précédent.

A. Largeur j *dans le sens du joint.* — Plus sont réduites les largeurs j_0, j_1 (f_1, f_2), mieux est déterminée la courbe de pression, mais plus le plomb travaille.



Voici comment ont varié $\frac{j_0}{e_0}$, $\frac{j_1}{e_1}$:

	Maximum	Minimum	Moyenne
$\frac{j_0}{e_0}$	0.50	0.13	0.237
$\frac{j_1}{e_1}$	0.50	0.10	0.242

B. Épaisseur. — Presque toujours 20^{mm} ; avec 20^{mm}, on ferme facilement le joint au mortier.

C. Longueur. — 1^m à 1^m50, avec intervalles entre les bandes de 10^{cm} ; aux têtes, de 5^{cm}.

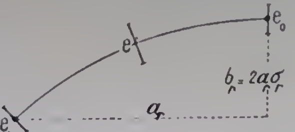
Art. 3. — Plomb employé. — Travail admis. —

On a employé, le plus généralement, le plomb mou ordinaire.

Souvent, on a admis une pression moyenne de 60^k sur toute la largeur de la bande, et supposé que la pression maxima ne dépasse pas 120^k, c'est-à-dire que la résultante se tient dans le 1/3 central de la bande.

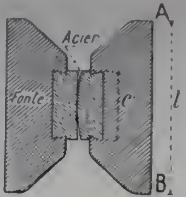
ARTICULATIONS ROULANTES

§ 1. — *ARTICULATIONS ROULANTES EN ACIER*



A. - Rotules d'acier prises dans des sabots en fonte

(Voûtes articulées de façon permanente)



Rayons des surfaces de roulement { convexe..... R_1 = 30 ; concave..... R_2 = 300

Corde de la courbe de roulement.......... c = 12

Largeur du sabot à la base.............. l = 30

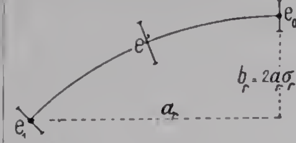
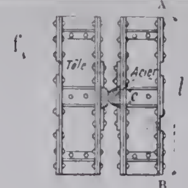
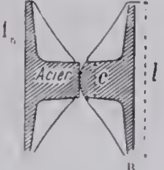
TABLEAU SYNOPTIQUE

Date	Ponts (Tous sont sous route) *Tous sont en Barière*		Symbole	Voûte: Portée totale $2a$	Voûte: Entre rotules: Portée $2a_r$	Voûte: Entre rotules: Surbaissement σ_r	Voûte: Épaisseurs, en 0m01: à la clef e_0	Voûte: Épaisseurs: aux joints de rupture e'	Voûte: Épaisseurs: aux retombées e_1	Voûte: Matériaux (*Les bandeaux sont en PT¹ — Muschelkalk, les sommiers, en PT¹ — Granit, sur eux, une feuille de plomb de 5mm*) Douelle et Queutage	Rotules: A-t-on mis des goujons contre le glissement ?	Efforts² en kg par 0m01 d'arête de contact: à la clef N_0	Efforts²: aux retombées N_1	Effort MAX. en kg $\overline{0^m01}^2$ le long de AB (f_3)
1902-03	**Cornélius,**	sur l'Isar, à Munich	$\bar{A}^n$ r^{te} ($\geq 40^m$)^3	44m / 2 de 38m50	41m / 36	1/12 / 1/10	80cm / 70	120cm / 100	90cm / 80	PT¹ - Muschelkalk B¹	non	2872k	3105k	120k
1902-03	de **Reichenbach,**		$\bar{A}^n$ r^{te} ($\geq 40^m$)^4	44	41	1/10	80	120	90	B¹ - 1v, 2v5, 5v	non	2160	2340	96
1903-05	**Maximilien,**		$\bar{A}^n$ r^{te} ($> 40^m$)^6	45.87	44	1/8.979	80	109	117.5	PT¹ - Muschelkalk	oui³	2460	3241	»
1904-05	de **Wittelsbach,**		$\bar{A}^n$ r^{te} ($\geq 40^m$)^7	44	41	1/10	80	120	90	B¹ - 1v, 2v5, 5v	oui	»	2430	»
1906-07	**Elise,** sur le Danube, à Neubourg.		$\bar{A}^1$ r^{te} ($\geq 40^m$)^4	47.50	43.50	1/9.88	95	120	115	B¹ - 1v, 2v3, 4v6	oui	2565	2817	125

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6.

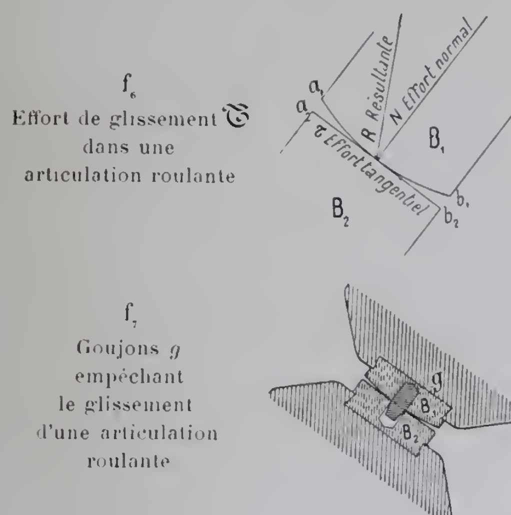
2. — Pour la pression maxima sur la bande de contact, les formules de Hertz (Tome IV, p. 11), donnent de 4700k à 5600k par $\overline{0^m01}^2$.

3. — Après la chute des voûtes.

Date	Ponts — On a souligné ceux sous rails	Intrados — Rang dans les séries > 40m	Voûte — Portée totale $2a$	Voûte — Entre rotules — Portée $2a_r$	Voûte — Entre rotules — Surbaissement σ_r	Voûte — Épaisseurs en 0m01 — à la clef e_0	Voûte — Épaisseurs en 0m01 — aux joints de rupture e'	Voûte — Épaisseurs en 0m01 — aux retombées e_1	Matériaux	Sommiers[5]	Rotules — Nature de l'acier, Résistance à l'écrasement en kg 0m01²	Rotules — Rayons en 0m01 des surfaces de roulement — convexe R_1	Rotules — Rayons — concave R_2	Rotules — Corde de la courbe de roulement c	Rotules — A t on mis des goujons contre le glissement?	Rotules — Largeur de la base l	Effort en kg par 0m01 d'arête de contact — à la clef N_0	Effort — aux retombées N_1	Effort max. en kg 0m01² le long de AB (f_1, f_r)
	B. — Rotules d'acier prises dans des caissons en tôle 																		
	B₁. — Voûtes semi-articulées																		
19 10/12	sur la <u>**Cecina**</u> [2] (*Italie*).	A³ Fr	30m	30m	1/8.82	100	»	125	B¹ Ciment ... 350k, Sable ..... 0m³5, Gravier ... 0m³8, 240k à 281			8cm	10cm	5cm5	non	Clef 80, Retbées 100			
	B₂. — Voûtes articulées de façon permanente																		
1902	de **Tarvis,** sur la Schlitza [3] (2 ponts) (*Autriche-Carinthie*).	A¹ Fte	30	30.40	1/9.8	70	82	70	B¹ 1v, 2v, 3v	Caissons en tôle d'acier Martin, de 22mm d'épaisseur	Acier Martin moulé (5800k à 5000k)	15	17		non	60			
1903	de **Forst,** sur l'Etsch [1] *Autriche (Tyrol).*	A¹ Fte	30	30.40	1/9.8	70		70	1v, 2v5, 4v										
	C. — Rotules tout entières en acier moulé *(Voûtes articulées de façon permanente)*																		
19 03/04	d'<u>**Illerbeuren,**</u> sur l'Iller (*Bavière*).	A¹ Fr (> 40m)[1]	59	57.164	1/5.82	110	163 / 165	140	1v, 2v5, 5v	B¹ moulé 1v, 1v5, 1v5 et feuille de plomb de 4mm	Acier Siemens-Martin surfaces trempées sur 5mm 7300k	35	200		non	46	2738k	2932k	68k
19 04/05	de la **Wallstrasse,** à Ulm (*Wurtemberg*)	A¹ Fte (> 40m)[3]	65.45	57	1/9.827	106	160	150	B¹ 1v, 3v, 5v	B¹ damé 1v, 1v, 2v5	Acier Siemens Martin surfaces trempées sur 4mm	40	55	10	oui	65	4060	4460	
1906	de <u>**Kempten,**</u> sur l'Iller (*Bavière*)	A¹ Fr (> 40m)[1,2,3]	64.50 / 63.80	50.60	1/5.50	135	200	185	1v, 2v5, 5v	B¹ moulé 1v, 2v, 2v	Surfaces trempées sur 10mm au moins 5500k	Clef 50, Retbées 60	200		non	Clef 60, Rtbées 72	3132	4207	66
19 05/08	de **Mannheim,** sur le Neckar (*Grand Duché de Bade*)	Aⁿ Fte (> 40m)[9]	59.50	58.50	1/10.60	107	147	112	Bandeaux PT¹ – Grès; Corps : B¹ - 1v, 4v, 3v	PT¹ Granit et feuille de plomb de 4mm	»	30	60		oui				143

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. 11, n° 6.
2. — Pont à 3 voies. — Ligne de Rome à Pise. — 3 arches semi-articulées de 30m en arc, entre 2 inarticulées de 20m en ellipse. — (Rivista tecnica delle ferrovie italiane, mai 1912. « Nuove ponte per tre binari sui fiume Cecina al km 282,071 della linea Roma Pisa »).
3. — 2 Ponts pareils sur la Route impériale de Goritz (*Gorzer Reichsstrasse*), aux km. 2.7385 et 2.945. (Œsterreichische Wochenschrift fur den öffentlichen Baudienst, 30 mai 1903, p. 344 à 350, Pl. 37 à 40. « *Beton Fogenbrucken uber di Schlitza bei Tarvis* », Julius Stanek, K. K. Ober-Ingenieur im Ministerium des Innern).
4. — Pont semblable aux précédents. (Œsterreichische Wochenschrift fur den offentlichen Baudienst, 2 juillet 1904, p. 476 à 479, Pl. 63, 64. « *Die neue Brucke uber die Etsch bei Forst* » C. Haberkalt).
5. — Au Pont de Grunwald sur l'Isar, en amont de Munich (1903 1904). — 2 arcs en béton armé ; Portée 70m ; Montée 12m80, les rotules en acier moulé, (R_1 20 ; R_2 25), pressent par l'intermédiaire de lames de plomb de . m, sur des sommiers en *béton armé*. (Deutsche Bauzeitung, 1904, I, n°s 11, 12, 13 « *Strassenbrucke uber die Isar bei Grunwald oberhalb Munchen* », von Direktor Ludwig Zollner, in München).

Art. 2. — Précautions contre le glissement. — Si la surface de roulement a_2 b_2 (f_6) est plane, — ou concave avec un très grand rayon, — c'est le frottement seul qui résiste à l'effort tangentiel $\mathfrak{T}$ [6].



f_6 Effort de glissement $\mathfrak{T}$ dans une articulation roulante

f_7 Goujons *g* empêchant le glissement d'une articulation roulante

Au pont d'Illerbeuren [7], les rotules ont glissé au décintrement, de 10^{mm} et 18^{mm}.

Au pont Maximilien [8], on avait diminué le frottement en lubrifiant les surfaces à la stéarine : les rotules ont glissé, les voûtes sont tombées.

Depuis [9], dans les articulations métalliques, on a en général prévenu le glissement en encastrant dans le bloc convexe B_1, sur l'arête théorique de contact, des goujons d'acier *g* [10] (f_7).

Art. 3. — Avantages et inconvénients. — Avec l'acier, — le plus dur des matériaux pour rotules, — les rayons des surfaces de roulement sont plus petits, la différence de courbure plus grande, la courbe de pression mieux déterminée. Mais les rotules d'acier craignent la rouille, et on ne peut guère les en défendre [11].

6. — Voir, pour la valeur du frottement, les expériences de M. Föppl, Tome IV, p. 22.

7. — $\overline{\mathbf{A}}^1$ Fr ($\geqslant$ 40^m)^1, 1903-04, Tome IV, p. 159.

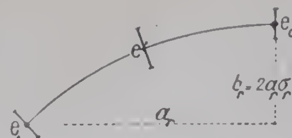
8. — $\overline{\mathbf{A}}^n$ rte ($\geqslant$ 40^m)^6, 1903-05, Tome IV, p. 192.

9. — Voir les Tableaux synoptiques, p. 263 et 264.

On n'a pas mis de goujons aux Ponts de Kempten, $\widehat{\mathbf{A}}^1$ Fr ($\geqslant$ 40^m)$^{1, 2, 3}$ (Tome IV, p. 115), sans doute parce que l'arc articulé est peu surbaissé et que par suite le glissement est moins à craindre.

10. — On les calcule pour résister par cisaillement à l'effort $\mathfrak{T}$.

11. — Au pont d'Illerbeuren [7], on a vu sur le sol des taches de rouille sous les rotules.



Art. 1. — Épaisseurs et Matériaux des Voûtes.

Schéma de l'articulation	Date	Ponts On a souligné ceux sous rails	Pays	Intrados Rang dans les séries > 40m	Voûte Portée totale $2a$	Entre rotules Portée $2a_r$	Entre rotules Surbaissement σ_r	Épaisseurs, en 0m01 à la clef e_0	Épaisseurs, en 0m01 aux joints de rupture e'	Épaisseurs, en 0m01 aux retombées e_1
a) – **En Pierre**					*A. – Voûtes semi-articulées*					
	1880	de **Langenhennersdorf** [2]	Saxe	$\widehat{\mathbf{A}}^{n}\ \mathrm{F}^{r}$	13m	13m	1/4.33	50cm	»	60
					B. – Voûtes articulées					
	1898-1900	de **Chemnitz**	Saxe	$\mathbf{E}^{n}\ \mathrm{F}^{r}\ (> 40^m)^1$	43.10 27.90 (4 vtes) 26.65 (6 vtes)			110 70 »	150 103 »	125 80
f_8	1899-1900	de **Grasdorf**	Hanovre	$\overline{\mathbf{A}}^{1}\ \mathrm{I}^{te}\ (> 40^m)^1$	40	40.39	1/8.93	85	116	90
	1901-03	de **Hochberg**	Wurtemberg	$\overline{\mathbf{A}}^{n}\ \mathrm{I}^{te}\ (> 40^m)^2$	39.40	40	1/7.407	75	104	75
	1902	de **Dusseldorf** [3]	Prusse rhénane	$\overline{\mathbf{A}}^{1}\ \mathrm{I}^{te}$	30.13	28.02	1/14.6	65	85	70
	1903-04	de **Göhren**	Saxe	$\overline{\mathbf{A}}^{1}\ \mathrm{I}^{te}\ (\geqslant 40^m)^2$	60	60.56	1/8.89	110	150	120
	1908-10	de **Kubel** [4], sur la Sitter	Suisse	$\mathbf{C}^{n}\ \mathrm{F}^{r}$	25	19.04	1/4.327	100	»	126
	1910-11	de **Nesslau** [5], sur la Thur	Suisse	$\overline{\mathbf{A}}^{1}\ \mathrm{F}^{r}$	24.82	25.66	1/7.265	110	140	140
f_9	1896	d'**Imnau** [6], sur l'Eyach	Hohenzollern	$\overline{\mathbf{A}}^{1}\ \mathrm{I}^{te}$	»	30	1/10	45	80	50
f_{10}	1903-05	de **Neckargartach**	Wurtemberg	$\overline{\mathbf{A}}^{n}\ \mathrm{I}^{te}\ (\geqslant 40^m)^5$	40	40	1/7.55 à 1/9.14	75	100 env.	80
b) – **En Béton**	1894-96	de **Dresde** [7]	Saxe	$\mathbf{E}^{5}\ \mathrm{F}^{r}$	31.35 (5 vtes)					
	»	de **Hauconcourt** [8] (sur la Moselle)	Lorraine allemande	$\overline{\mathbf{A}}^{5}\ \mathrm{I}^{te}$	33 (5 vtes)	33	1/7.67	65	125	77
	1899-1901	de **Malling** (sur la Moselle)	Lorraine allemande	$\overline{\mathbf{A}}^{n}\ \mathrm{I}^{te}\ (\geqslant 40^m)^1$	40	40.50	1/8.56	88	110	100
f_{11}	1904-05	de **Moulins-lez-Metz** (sur la Moselle)	Lorraine allemande	$\overline{\mathbf{A}}^{n}\ \mathrm{I}^{te}\ (> 40^m)^8$	44 40 (2 vtes)	44.70 40.54	1/7.996 1/8.463	95 90	119 112	115 105
	1906-07	de **Sauvage** [9] (sur la Moselle)	Lorraine allemande	$\overline{\mathbf{A}}^{1}\ \mathrm{I}^{te}$	36 34 (2 vtes) 30	36 34 30	1/7.04 1/7.53 et 1/8.27 1/7.75	70 70 70	115 100 98	80 80 80
	»	de **Halden** [10], sur la Lenne *(arche centrale)*	Westphalie		»	25	1/9.09	50		50
	1904-05	de **Britz** [11], sur le canal de Teltow (au sud de Berlin)	Prusse	$\overline{\mathbf{A}}^{1}\ \mathrm{I}^{te}$	39	36.42	1/7.5	75	112	80
	1909-10	de **Dennhausen** [12], sur la Fulda	Prusse, Hesse	$\overline{\mathbf{A}}^{3}\ \mathrm{I}^{te}$	38 (3 vtes)	36	1/8.93 et 1/9.39	70	92	75
c) – **En Béton armé** f_{12}	1907	de **Rothenburg** [13], sur la Neisse	Silésie	$\overline{\mathbf{A}}^{5}\ \mathrm{F}^{r}$	30 (5 vtes)	30.50	1/7.26	55	100	70
f_{13}	1907-10	de **Frédéric-Auguste** [14], à **Dresde**	Saxe	$\widehat{\mathbf{A}}^{9}\ \mathrm{I}^{te}$	39.30 (2 vtes) et 4 vtes de 36m15 à 28m33	34.10	1/6.9	95		125
	1911-12	de **Graveneck**	Prusse, Hesse	$\widehat{\mathbf{A}}^{1}\ \mathrm{I}^{te}\ (> 40^m)^1$	48	48.425	1/6.248	60	102	75

Dimensions et Travail des Rotules.

TABLEAU SYNOPTIQUE

Matériaux	Rotules – Matériaux. Résistance à l'écrasement en kg/0m01²	Rotules – Dispositif entre les surfaces de roulement	Rayons, en 0m01 des surfaces de roulement – convexe R1	Rayons – concave R2	Effort en kg par 0m01 d'arête de contact – à la clef N0	Effort – aux retombées N1	Pression maxima en kg/0m01² sur la bande de contact, indiquée par l'auteur du projet	
	Grès – 289k		97·7	110·5			31k	1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6. 2. — Zeitschrift der Architekten-und Ingenieur Vereins zu Hannover, 1888, p. 378 à 380. « *Über die Verwendung von drei Gelenken in Steingewölben* », von Geh. Finanzrath C. Köpeke, zu Dresden.
de façon permanente								
B [1] — 1v, 4v, 4v5						3510k	Pr. moyenne 300	
B [1] — 1v, 5v, 6v5						1830		
B [1] — 1v, 2v5, 4v5	*1099k*		Clef 185 / Retbées 200	270			145	
B [1] 1v, 2v5, 5v / 1v, 2v, 4v	Granit		500	∞			346	
B [1] — 1v, 4v, 4v (*275k à 6 mois*)			209	275				3. — Pont construit pour l'Exposition de Dusseldorf, démoli en 1908. (F. von Emperger – Handbuch für Eisenbetonbau, 2e édition vol. I, p. 214 à 230).
MOV [1] – Granulite			Clef 985 / Retbées 1086	2000	3850k	3960	150	4. — Viaduc de la ligne Romanshorn-St-Gall-Wattwil, près de St-Gall. Travée centrale de 120m, avec, de chaque côté, un viaduc d'accès en plein cintre de 25m. Piles-culées de 85m et 59m de haut entre la travee et les arches adjacentes, lesquelles sont articulées. (Schweizerische Bauzeitung, 10 sept. et 29 oct. 1910, « *Der Sitterviadukt der Bodensee-Toggenburgbahn* ». MM. A. Acatos, L. Lüchinger, A. Ackermann).
MEV [1]			Clef 100 / Retbées 240	120 / 300				
MEV [1]			Clef 325 / Retbées 400	385 / 475	1540	2177	70.5 / 75.5	5. — Ligne d'Ebnat à Nesslau. — Dessins d'exécution, gracieusement remis par M. Acatos, Ingénieur en chef du Bodensee-Toggenburgbahn.
B [1] — 1v, 2v5, 5v	*1006k*	Bandes de plomb de 5mm et 2 feuilles de cuivre	10	10.4	1414	1061	150	6. — Zeitschrift für Bauwesen, 1898, p. 187 à 206, Pl. 26.
B 1v, 2v5, 4v5 / 1v, 2v5, 1v5			500	∞		3200	538	
Béton: 1v, 5v, 6v75 / 1v, 5v, 5v	Béton: 1v, 2v5, 2v5		250	320	2310		Pr. moyenne 143 à 204	7. — 4 voies. — 5 voûtes de décharge en anse de panier de 15m à 31m, articulées à la clef et à 60°. — Aux plus grandes voûtes, les rotules sont en béton, aux autres, en grès. — (*Gewölbte Brucken*, Karl von Leibbrand, Leipzig 1897, p. 73 et 74).
1v, 3v, 4v5	1v, 2v5, 2v5		235	300	1590	1920	120 (Barkhausen)	8. — Centralblatt der Bauverwaltung, 22 juillet 1908, p. 395, 396. — Dessins d'exécution gracieusement remis par M. Blumhardt, Ingénieur en chef à Strasbourg.
1v, 3v, 6v / 1v, 3v, 4v5	1v, 2v, 2v	Sur 3cm à 4cm, mortier (c[t] 1v; sable fin 2v)	280	325	2280			
1v, 2v5, 5v / 1v, 2v, 4v Bandeaux en PT [1]	1v, 2v, 2v	*Fond des moules en fonte*	280	325	2330	2710		
1v, 2v5, 5v	1v, 2v, 2v	*Fond des moules en plâtre*	250	327		1500	104 (Barkhausen)	9. — Deutsche Bauzeitung, 1907. — Mitteilungen über Zement-, Beton-, und Eisenbetonbau, nos 18 et 19.
1v, 4v, 6v	1v, 2v, 2v *300k*	Bandes de plomb de 2mm	200	313			60	10. — Id., 1905, p. 45, 46. — Arches latérales articulées sur plomb.
1v, 5v, 6v5 / 1v, 4v, 4v Bandeaux en grès	1v, 2v5, 2v5 *172k à 28 j.*	Sur 10cm mortier (1v, 2v)	280	325				11. — Deutsche Bauzeitung, 9 septembre 1905, p. 433 à 436.
1v, 3v5, 3v5	1v, 1v, 2v5							12. — F. von Emperger. — Handbuch für Eisenbetonbau, 2e édition. Vol. VI. Brückenbau, p. 511 et 664.
Béton: 1v, 5v	Béton armé: 1v, 3v	Sur 10cm mortier (1v, 2v5)	290	350				13. — Deutsche Bauzeitung, 1908. — Mitteilungen über Zement-, Beton-, und Eisenbetonbau, n° 20, p. 101, 102, n° 21, p. 106, 107.
Bandeaux en grès	1v, 2v5, 2v5						90	14. — A 3 arches de 17m60, 22m, 24m05, les articulations sont des bandes de plomb occupant le 1/4 central du joint. (Deutsche Bauzeitung, 1910; 8 juin, p. 354, 355, 11 juin, p. 363, 367; 22 juin, p. 383 et 384).
1v, 2v, 5v	1v, 1v5, 2v5	Mortier (1v, 1v)	Clef 350 / Retbées 340	450 / 425	1394	1683	177	

Art. 2. — Avantages et inconvénients des articulations roulantes en pierre, en béton. — En pierre ou en béton, les articulations ne craignent pas l'humidité ; elles n'exigent pas d'entretien ; mais elles sont lourdes et il est malaisé de les mettre en place [15].

Il est très difficile de bien dresser les surfaces de roulement.

15. — Pont de Grasdorf $\overline{\mathbf{A}}^1$ r^{te} ($\geqslant$ 40m)^1, Tome IV, p. 129.

Art. I. — Épaisseurs et Matériaux des voûtes. — Dimensions et Travail des rotules TABLEAU SYNOPTIQUE

Schéma de l'articulation	Date	Ponts — Tous sous route	Intrados — Rang dans les séries > 40m	Voûte — Portée totale $2a$	Voûte — Entrerotules — Portée $2a_r$	Voûte — Entrerotules — Surbaissement σ_r	Voûte — Épaisseurs en 0m01 — à la clef e_0	Voûte — Épaisseurs — aux joints de rupture e'	Voûte — Épaisseurs — aux retombées e_1	Matériaux — Voûte (Vte) Sommiers (Somm.)	Rotules — Tourillon — Matière	Rotules — Tourillon — Diamètre d	Rotules — Balanciers — Matière	Rotules — Balanciers — Largeur l	Efforts en kg par 0m01 de génératrice de contact — à la clef N_0	Efforts — aux retombées N_1	Efforts maxima en kg 0m01² — Tourillon	Efforts maxima — Balanciers	Efforts maxima — Sommiers	Les rotules sont-elles apparentes ?
	1895	d'**Inzigkofen** *(Hohenzollern)*	Ā¹ 1re (> 40m)[1]	47m90	43m	1/9.81	70	110	78	B¹ Vte: 1v, 2v5, 4v5 / 1v, 2v, 3v; Somm. (1v, 1v5, 1v5)	Fonte[2]			Clef 60, Retomb. 68	2125k	2358k	Clef 232k, Retbées 292	Flexion 128k, 131	44k, 43[3]	oui
Acier; Fonte ou Acier	1899/1900	de **Neckarhausen** *(Hohenzollern)*	Ā¹ 1re (> 40m)[2]	59.40	50	1/11	85	120	90	B¹ – 1v, 2v5, 5v	Acier	10	Fonte	75	3820	3648	Clef 382, Retbées 365	Tension 221, Compr 346	Clef 64, Retbées 58¹	oui
	1900/01	du **Prince-Régent** à Munich.	Ā¹ 1re (> 40m)[3]	62.40	63	1/9.692	100	148	120	Vte – PT¹ Muschelkalk; Somm. (PT¹ – Granit) feuille de plomb de 5mm	[5]				4170	4300	600		100	non
	1901/02	**Max-Joseph** à Munich.	Ā¹ 1re (> 40m)[4]	64	60	1/10	105	140	120	PT¹ Vte Muschelkalk; Somm. (Granit)	[6]									non
Fonte; Acier	1897	de **Burzweiler**[7] sur la Doller *(Alsace)*	Ā¹ 1re	34.20	34	1/8.39	75	105	75	B¹ – 1v, 3v, 4v5		8								oui
Fonte; Acier	1906	de **Brookside Park**[8] sur le Big Creek, à Cleveland *(États-Unis, Ohio)*	Ā¹ 1re	28.04	26.33	1/16.5	61		91	B¹ – 1v, 2v5, 5v		3.8		15.2						non
Acier	1906	par-dessus la gare d'eau **Branla**[9] sur la Saône, près de Lyon	Ā¹ Ā¹ 1re	25 (2 voûtes jumelles)	25	1/10	30		30	PT¹ Joints en zinc coulé		7	Acier	30			260			oui

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement. Tome IV, p. II, n° 6.
2. — 8 rotules à la clef, 9 aux retombées. — L'ensemble pèse 15t et coûte 3700f.
3. — en tenant compte du vent ; sans vent, 32k1.
4. — en tenant compte du frottement des tourillons.
5. — 30 rotules par articulation.
6. — Les rotules pèsent ensemble 60t.
7. — Dr Ing. F. von Emperger. — Handbuch für Eisenbetonbau. - Dritter Band. - Berlin, Wilhelm Ernst et fils, p. 22 à 24.
8. — Engineering News, 1er mai 1906, p. 507 et 508. « *Three hinged concrete arch bridge, Brookside Park, Cleveland, O* ». H. F. Hackedorn.
9. — Annales des Ponts et Chaussées, 1907, V, p. 6 à 59. « *Pont à arcs de pierre de taille articulés à la clef et aux naissances, avec joints coulés en zinc* ». M. Henri Tavernier, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

Art. 2. — Avantages et inconvénients des articulations tournantes. — D'après M. Max Leibbrand [10], auteur des ponts d'Inzigkofen [11], de Neckarhausen [12], de Sigmaringen [13], l'articulation tournante serait moins chère, plus sûre, plus facile à poser, que l'articulation roulante.

L'expérience ne paraît pas avoir décidé.

10. — Zeitschrift für Bauwesen, 1903, - p. 455 à 476, Pl. 54 et 55 : « *Die Neckarbrücke bei Neckarhausen (Hohenzollern)* », Max Leibbrand, Landes-Baurat, 20 août 1902.

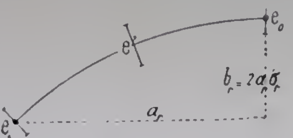
11. — $\overline{\mathbf{A}}^{1}$ r^te^ ($\geqslant$ 40^m^)^{1}, Tome IV, p. 225.

12. — $\overline{\mathbf{A}}^{1}$ r^te^ ($\geqslant$ 40^m^)^{2}, Tome IV, p. 232.

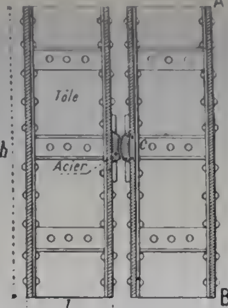
13. — Tome IV, p. 253.

ARTICULATIONS A GENOU

EMPLOYÉES SEULEMENT COMME ARTICULATIONS PROVISOIRES, PUIS CONDAMNÉES



Rotules d'acier prises dans des caissons en tôle.



Epaisseurs et Matériaux des Voûtes. — Dimensions et Travail des rotules.

TABLEAU SYNOPTIQUE

Date	Ponts — On a souligné ceux sous rails	Pays	Intrados — Rang dans les séries $\geqslant 40^m$	Voûte — Portée totale $2a$	Voûte — Entre rotules — Portée $2a_r$	Voûte — Entre rotules — Surbaissement σ_r	Voûte — Épaisseurs, en 0m01 — à la clef e_0	Voûte — Épaisseurs — aux joints de rupture e'	Voûte — Épaisseurs — aux retombées e_1	Voûte — Matériaux	Rotules d'acier, Surfaces de roulement — Rayon R	Rotules — Corde c	Caissons en tôle — Hauteur h	Caissons en tôle — Largeur l	Effort en Kg par 0m01 de génératrice de contact — à la clef N_0	Effort — aux retombées N_1	Efforts maxima en Kg $\overline{0^m01}^2$
1893	de **Munderkingen**.	Wurtemberg	A[1] r^te (≥ 40m)[1]	59m	50m	1/10	100c	140	110c	B[1] - 1v, 2v5, 5v	15c	7c	80c	23c	3413k	3846k	au contact 681k; dans les caissons (flexion) 870; sur AB de f₁, 59
1895-96	de la **Coulouvrenière**, à Genève.	Suisse	A[n] r^te (≥ 40m)[1]	40	40	1/7.407	100	140	120	B[1] - 425k, 0mc5, 0mc8	10	5,5	100	28	2014	2357	
1901	de **Sinigaglia**[2], sur le Rosso.	Italie	A[3] F^r	»	22	1/10	80		100								
1902-03	de **Morbegno**.	Italie	A[1] F^r (≥ 40m)[1]	70	66 environ	1/7	150		220	PT[1] - Granit	25	15	Clef 80, Ret^bées 110	27.2	5980	5567	au contact 500; dans les caissons Clef 750[3], Ret^bées 850

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6.

2. — Ligne de Bologne à Foggia (Genio Civile, septembre 1902).

3. — en tenant compte du mortier de ciment entre les caissons d'une même pile, et en lui attribuant un coefficient d'élasticité $\frac{1}{10}$ de celui de la tôle.
sans en tenir compte, la tôle des caissons travaille à 1150k à la clef, et 1300k aux retombées (S''₁, Tome IV, p. 75).

CHAPITRE V

DISPOSITIONS DES ARTICULATIONS DANS LES PONTS BIAIS

Aux ponts de Munderkingen[1] biais à 75°, et Elise[2] biais à 81°20, les articulations sont en échelons perpendiculaires à l'axe longitudinal.

Au pont de Sigmaringen[3], biais à 75°57', on a disposé les rotules parallèlement à l'axe transversal du pont, en prévenant le glissement latéral.

Dans les ponts larges très biais, il vaudrait mieux construire la voûte par anneaux indépendants.

1. — $\bar{A}$ 1re (> 40m) — Tome IV, p. 45.
2. — $\bar{A}$ 1re (> 40m) — Tome IV, p. 151.
3. — Tome IV, p. 253.

TITRE II

QUELQUES DIMENSIONS ET DISPOSITIONS SPÉCIALES AUX VOÛTES ARTICULÉES

§ 1. — *RENFLEMENT AUX « JOINTS DE RUPTURE »*

Pour ne pas avoir de tension entre les articulations de clef et des reins, on a souvent renflé la voûte en fuseau, forme désagréable, surtout quand l'arc n'est pas très surbaissé.

Si les tympans sont pleins, on peut le dissimuler; non, s'ils sont évidés.

§ 2. — *ÉPAISSEURS*

Art. 1. — Les voûtes articulées sont moins épaisses que les inarticulées. — Dans les voûtes à 3 articulations, on est sûr des efforts : comme ils sont, du moins près des articulations, concentrés vers les milieux, les matériaux sont mieux utilisés.

Pour ces deux motifs, les épaisseurs y peuvent être moindres que dans les voûtes inarticulées.

De combien ?

Art. 2. — Formules empiriques provisoires. — Il n'existe pas encore assez de voûtes articulées pour établir des formules empiriques d'épaisseurs auxquelles on se puisse fier.

Voici les timides indications permises.

Entre leurs rotules, les ponts articulés sont toujours en arc, assez ou très surbaissé; pour ces arcs, inarticulés, voici les formules empiriques établies : [1]

$$e_0 \begin{pmatrix}\text{épaisseur}\\ \text{à la}\\ \text{clef}\end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix}\text{coefficient}\\ \text{numérique}\end{pmatrix} \left[1 + \sqrt{2a\ (\text{portée})}\right] \times \frac{4}{3}\left[1 - \sigma\ (\text{surbaissement}) + \sigma^2\right]$$

$$e_1 \begin{pmatrix}\text{épaisseur}\\ \text{aux reins}\end{pmatrix} = \lambda\, e_0 = e_0 \times (1 + 12\,\sigma^2)$$

Entendons ici par $2a$ la portée, et par σ le surbaissement, entre articulations et non plus entre naissances.

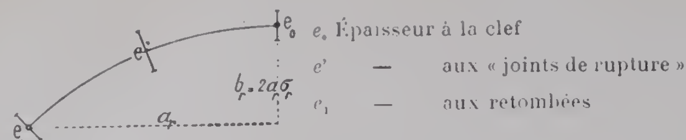
Soit $e' \begin{pmatrix}\text{épaisseur au « joint de rupture »}\\ \text{c'est-à-dire au joint le plus renflé}\\ \text{entre les articulations de clef et des reins}\end{pmatrix} = \lambda' e_0$

Au tableau suivant, on donne α, λ, λ', pour 74 voûtes semi-articulées ou articulées.

D'après lui, il semble qu'on puisse provisoirement conserver pour l'épaisseur à la clef des voûtes articulées les formules des voûtes inarticulées, en abaissant le coefficient numérique α, — par exemple pour un pont-route de 0,15 à 0,09 [2].

1. — Tome III, Livre II, Titre I, Chapitre III.

2. — α est réduit à 0,095 pour les voûtes inarticulées en arc très surbaissé de 40m et plus, de Ziegenhals, Michelau, Schwusen, Kupferhammer (Tome III, p. 208, 209, 213, 214); il descendrait même à 0,075 au pont de Huzenbach (Tome III, p. 206).



e_0 Épaisseur à la clef
e' — aux « joints de rupture »
e_1 — aux retombées

Rapports : $\alpha_r = \dfrac{e_0}{\left(1+\sqrt{2a_r}\right)\frac{4}{3}\left(1-\sigma_r+\sigma_r^2\right)}$

I. — VOÛTES SEMI-ARTICULÉES

A. — PONTS-ROUTE

Articulations sur plomb

Pont de [3]	Portée totale $2a$	Portée entre rotules $2a_r$	Matériaux[4] du corps de la voûte	α_r	λ	λ'
Höfen	41m	28m	PT	0.132	1.5	
Wildbad	22.60	15.60	PT	0.090	1.6	
Nenneck	23	17	PT	0.068	2	
Marbach	43.50	32	MEV	0.148	1.25	
Baiersbronn sur la Murg	40	33	PT	0.071	1.33	
Baiersbronn sur la Forbach	32	25	PT	0.081	1.33	
Ehingen Passage supérieur	23	18		0.078	2.22	
Rechtenstein	23	23	B	0.093	1.38	
Mühlheim	29.20	22	B	0.066	1.33	
sur le Lein	29.60	23.10	B	0.077	1.60	
Gemmrigheim	38	38		0.091	1.12	
			MAX.	0.148	2.22	
			min.	0.068	1.12	
moyenne			....	0.091	1.51	
moyenne sans compter Hofen et Marbach				0.080	»	

Articulations à genou

Pont de	$2a$	$2a_r$	Matériaux	α_r	λ	λ'
Munderkingen	59	50	B	0.101	1.1	1.4
Coulouvrenière	40	40	B	0.115	1.2	1.4

B. — PONTS SOUS CHEMIN DE FER À VOIE NORMALE

Articulations sur plomb

Pont de	$2a$	$2a_r$	Matériaux	α_r	λ	λ'
sur la Vieille-Route, à Lichtensteig	18.50	18.50	MOV	0.151	1	»

Articulations roulantes

Pont de	$2a$	$2a_r$	Matériaux	α_r	λ	λ'
en pierre						
Langenhennersdorf	13	13	»	0.098	1.20	
en acier						
sur la Cecina	30	30	B	0.128	1.25	

Articulations à genou

Pont de	$2a$	$2a_r$	Matériaux	α_r	λ	λ'
Sinigaglia	»	22	»	0.115	1.25	
Morbegno	70	66 env.	PT	0.137	1.47	

II. — VOÛTES ARTICULÉES DE FAÇON PERMANENTE

A. — PONTS-ROUTE

Articulations sur plomb

Pont de [3]	Portée totale $2a$	Portée entre rotules $2a_r$	Matériaux[4] du corps de la voûte	α_r	λ	λ'
Miltenberg	31m15	30m60	MOV	0.091	1.14	1.[illegible]
Miltenberg	31.20	30.64	MOV	0.100	1.13	1.1[illegible]
Oued Dar-el-Oued	25	21.65	MAV	0.117	1.57	»
Oued Amacin	27	27	MAV	0.119	1.29	»
Reichenbach (Voûtes R D)	28-27-26		B		1.14	[illegible]
Oued Djemaa	29.43	27	MAV	0.126	1.28	»
Altwasser	23.72	22	B	0.080	1.15	1.2[illegible]
Halden (Arches latérales)		18.50	B	0.078	1.30	»
Durbuy		33	PT	0.121		1.5[illegible]
			MAX.	0.126	1.57	
			min.	0.078	1.13	
			moy.	0.101	1.25	

Articulations roulantes

Pont de	$2a$	$2a_r$	Matériaux	α_r	λ	λ'
en pierre						
Grasdorf	40	40.39	B	0.095	1.05	1.3[illegible]
Hochberg	39.40	40	B	0.090	1	1.3[illegible]
Dusseldorf	30.13	28.02	B	0.083	1.09	1.3[illegible]
Göhren	60	60.56	MOV	0.101	1.09	1.[illegible]
Imnau		30	B	0.058	1.11	1.[illegible]
Neckargartach	40	40	B	0.086	1.06	1.3
en béton						
Hauconcourt	33	33	B	0.082	1.18	1.[illegible]
Malling	40	40.50	B	0.100	1.13	1.[illegible]
Moulins-lez-Metz	44	44.70	B	0.105	1.21	1.[illegible]
Moulins-lez-Metz	40	40.54	B	0.102	1.16	1.[illegible]
Sauvage	36	36	B	0.085		1.[illegible]
Sauvage	34	34	B	0.087 / 0.086	1.14	1.[illegible]
Sauvage	30	30	B	0.091		1.4
Halden (Arche centrale)		25	B	0.070	1	1.3
Britz	39	36.42	B	0.089	1.06	1.[illegible]
Dennhausen	38	36	B	0.083	1.07	1.[illegible]

3. — Pour ces ponts, voir les Tableaux synoptiques, p. 260, 261, 263, 264, 266, 269, 271.
4. — Pour le sens des abréviations, voir Avertissement, Tome IV, page 11, n° 6.

$\lambda = \frac{e_1}{e_0}$ $\lambda' = \frac{e'}{e_0}$

TABLEAU SYNOPTIQUE

II. — VOÛTES ARTICULÉES
DE FAÇON PERMANENTE *(Suite)*

A. — PONTS-ROUTE (Suite)

Pont de [3]	Portée totale $2a$	Portée entre rotules $2a_r$	Matériaux [4] du corps de la voûte	α_r	λ	λ'
Articulations roulantes *(Suite)*						
en béton armé						
Frédéric-Auguste, à Dresde	39m30	34m10	B	*0.120*	1.31	
Graveneck	48	48.425		*0.065*	1.25	
en acier						
Cornélius	44	41	PT	*0.088*	1.12	1.50
	38.50	36	B	*0.082*	1.14	1.43
Reichenbach	44	41	B	*0.090*	1.12	1.50
Maximilien	45.87	44	PT	*0.087*	1.46	1.36
Wittelsbach	44	41		*0.090*	1.12	1.50
Élise	47.50	43.50		*0.103*	1.21	1.26
Tarvis	30	30.40	B	*0.090*	1.	1.17
Forst				*0.090*	1.	»
Wallstrasse	65.45	57		*0.103*	1.41	1.51
Mannheim	59.50	58.50		*0.102*	1.04	1.37
Pour toutes les articulations roulantes			MAX.	*0.120*	1.46	1.92
			min.	*0.058*	1.	1.17
			moy.	*0.0895*	1.14	1.41
Articulations tournantes						
Inzigkofen	47.90	43	B	*0.078*	1.11	1.57
Neckarhausen	59.40	50		*0.086*	1.05	1.41
Prince-Régent	62.40	63	PT	*0.092*	1.2	1.48
Max-Joseph	64	60		*0.099*	1.14	1.33
Burzweiler	34.20	34	B	*0.092*	1.	1.40
Brookside Park	28.04	26.33		*0.079*	1.49	»
Braula	25	25	PT	*0.041*	1.	»
			MAX.	*0.099*	1.49	1.57
			min.	*0.041*	1.	1.33
			moy.	*0.081*	1.14	1.44
Pour toutes les voûtes articulées, sous route			MAX.	*0.148*	2.22	1.92
			min.	*0.041*	1.	1.12
			moy.	*0.091*	1.16	1.41

B. — PONTS SOUS CHEMIN DE FER
A VOIE NORMALE

Pont de [3]	Portée totale $2a$	Portée entre rotules $2a_r$	Matériaux [1] du corps de la voûte	α_r	λ	λ'
Articulations sur plomb						
Kempten (Arches latérales)	21m60	17m648	B	*0.127*	1.65	
	44.35	38.55		*0.135*	1.59	
Garching	33.95 / 33.89	28.90		*0.124*	1.61	
Articulations roulantes						
en pierre						
Chemnitz	43.10		B		1.14	1.36
Kubel	25	19.04	MEV	*0.169*	1.26	
Nesslau	24.82	25.66		*0.154*	1.27	1.27
en béton armé						
Rothenburg	30	30.50	B	*0.072*	1.27	1.81
en acier						
Illerbeuren	59	57.164	B	*0.112*	1.27	
Kempten (Grandes arches)	64.50 / 63.80	50.60		*0.148*	1.37	1.48

§ 3. — *JOINTS DE DILATATION*

Au-dessus des voûtes inarticulées, on n'a que très exceptionnellement prévu des joints de dilatation.

Dans les voûtes articulées, les mouvements dûs aux variations de température sont plus grands : les joints de dilatation y sont nécessaires au-dessus des articulations.

Ces joints verticaux qui coupent les tympans sont d'aspect assez fâcheux[5]. On les dissimule, si on le peut.

TITRE III

QUELQUES ÉLÉMENTS DE COMPARAISON
ENTRE LES VOÛTES INARTICULÉES ET ARTICULÉES

§ 1. — *PRIX DE REVIENT*

Les voûtes articulées coûtent-elles moins que les inarticulées ?

Sans doute, elles sont plus minces. Mais les articulations sont chères, difficiles à placer.

Il n'est guère possible de comparer utilement les unes aux autres : les projets, les matériaux, les conditions locales, les prix des carrières, des ouvriers, les fondations, diffèrent trop.

Si on compare quelques voûtes qui semblent à peu près comparables[6], on n'a

5. — Voir dans les monographies (Tome IV), les photographies des ponts de : Garching, p. 95, 97; Kempten, p. 119; Élise, p. 151; Illerbeuren, p. 159; Hochberg, p. 178; Mannheim, p. 207, 208.

6.

Pont de :	Symbole	Matériaux	$2a$	σ	Prix du m. q. en plan	Prix du m. c. du solide circonscrit
			VOÛTES ARTICULÉES			
Neckargartach	$\overline{A}^{n}$ r^{te} $(\geq 40^m)^5$	B	5 v^{tes} de 40^m	1 7,75 à 1 9,14	170^{f}1	15^{f}6
Wallstrasse	$\overline{A}^{1}$ r^{te} $(\geq 40^m)^3$	B	65^{m}45	1 5,48	216,4	19,0
Neckarhausen	$\overline{A}^{1}$ r^{te} $(\geq 40^m)^2$	B	59^{m}40	1 11	284,4	37,2
Moulins-l.-Metz	$\overline{A}^{n}$ r^{te} $(\geq 40^m)^8$	Bandeaux en PT Corps en B	44^m et 2 v^{tes} de 40^m	1 7,72 et 1 8,37	227,1	24,2
Maximilien	$\overline{A}^{n}$ r^{te} $(\geq 40^m)^6$	PT	2 v^{tes} de 45^{m}87	1 8,98	431,5	39,0
Illerbeuren	$\overline{A}^{1}$ F^{r} $(\geq 40^m)^1$	B	59^m	1 5,82	274,9	21,7
			Moyennes............		267^{f}4	26^{f}1
			VOÛTES INARTICULÉES			
Schweich	$\overline{A}^{n}$ r^{te} $(\geq 40^m)^7$	B	3 v^{tes} de 46^m	1 7,45	135^{f}2	13^{f}0
Guggersbach	$\widehat{A}^{1}$ r^{te} $(\geq 40^m)^{11}$	B	50^{m}20	1 6,11	156,6	15,6
Claix	$\widehat{A}^{1}$ r^{te} $(\geq 40^m)^5$	PT, MEV, MOV	52^m	1 6,46	251,6	26,6
Boucicaut	$\overline{A}^{n}$ r^{te} $(\geq 40^m)^2$	PT, MAV	5 v^{tes} de 40^m	1 8	259,7	21,3
Orléans	$\overline{A}^{n}$ r^{te} $(\geq 40^m)^4$	PT, MAV	7 v^{tes} de 43^{m}85	1 7,56	482,2	39,2
Gour-Noir	$\widehat{A}^{1}$ F^{r} $(\geq 40^m)^6$	PT, MEV	62^m	1 3,73	383,2	22,3
			Moyennes............		278^{f}1	23^{f}0

pas l'impression qu'il y ait économie à articuler.

§ 2. — *MOUVEMENTS DE LA CLEF AU DÉCINTREMENT, AUX CHANGEMENTS DE TEMPÉRATURE*

Dans les voûtes inarticulées, les sections d'appui et de clef restent dans le même plan : elles contrarient les mouvements de la clef.

Dans les voûtes articulées, elles se meuvent librement.

Ces mouvements y devraient être plus grands.

En comparant ce qu'indiquent nos tableaux synoptiques, on ne le constate guère.

Nombre de voûtes inarticulées, très bien faites, en excellents matériaux (par exemple, celles de Valence), ont tassé tout autant qu'un pont articulé d'intrados comparable.

C'est que les tassements dépendent d'une foule de causes qui masquent l'effet de l'articulation : forme de la voûte, — portée totale et entre rotules, — type de rotules, — matériaux (pierre, mortier), — soins dans l'exécution, — mode d'exécution (rouleaux, tranches), temps sur cintre, — époque du décintrement, — écart de température entre le clavage et le décintrement, — sécheresse ou humidité du cintre, de la voûte, — résistance des appuis, etc....

TITRE IV

QUELLES VOÛTES FAUT-IL ARTICULER ?

§ 1. — *LES VOÛTES ARTICULÉES, PLUS SOUPLES, SE PRÊTENT A DES MOUVEMENTS QUI TROUBLENT LES AUTRES. ELLES PEUVENT ÊTRE ACCEPTÉES SUR DES SOLS OU CONTRE DES APPUIS QUI CÈDENT.*

Dans les voûtes à 3 articulations, la courbe de pression est toujours fixée en trois points.

Elles supportent, sans fissures :

pendant la construction, les mouvements du cintre : tassement sous la charge, gonflement des bois par l'humidité, leur contraction par la sécheresse ;

puis, le tassement au décintrement ;

puis, l'ouvrage achevé, les mouvements au passage des surcharges ; — les montées et descentes dûes aux élévations ou abaissements de température (mouvements qui n'augmentent pas leur travail) ; — le gonflement des voussoirs à l'imbibition, — leur contraction à la dessication ; — un mouvement des appuis

(culées ou piles) dû à un tassement du sol[7, 8, 9] ; — le recul d'une culée trop faible, la courbure élastique d'une culée trop haute[10].

§ 2. — *DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE DES VOÛTES ARTICULÉES*

Art. 1. — Pays où l'on n'a articulé que très exceptionnellement les voûtes. — Je connais seulement :

en France[11], les deux anneaux de 25^m du pont Branla[12], les 10 voûtes de 25 à 29^m43 des Ponts algériens de l'Oued Dar-el-Oued[13], de l'Oued Amacin[14], et de l'Oued Djemaa[15] ;

en Autriche, les voûtes de 30^m des deux ponts de Tarvis[16] et du pont de Forst[17] ;

aux Etats-Unis, la voûte de 28^m04 du pont de Brookside Park, à Cleveland[18].

On a articulé :

en Italie : au poids mort seulement, la voûte de 70^m du pont de Morbegno[19], les deux voûtes de 22^m du pont de Sinigaglia[20] ;

en Suisse : au poids mort seulement, les deux voûtes de 40^m du pont de la Coulouvrenière[21] à Genève; la voûte de 18^m50 du pont sur la Vieille-Route à Lichtensteig[22] ; — et aussi sous les surcharges : les 2 voûtes en plein cintre de 25^m du viaduc sur la Sitter[23], encadrant la travée métallique du milieu; la voûte en arc de 24^m82 du pont de Nesslau[24].

Art. 2. — Allemagne. — C'est en Allemagne qu'on a commencé à articuler les ponts et qu'on en articule le plus.

7. — A un arc de 13^m, surbaissé à 1/7,86, à articulations roulantes en béton, la culée rive gauche avait, à la suite d'une inondation, tassé au point que le contact de clef ne se faisait plus qu'à l'arête supérieure.

On consolida la culée en mouvement ; on remit la voûte sur cintre ; on remplaça les blocs de clef qu'on fit se toucher plus bas qu'au milieu.

Deux ans après, on n'avait pas constaté de nouveau mouvement.

Deutsche Bauzeitung, 1908, 23 mai, p. 283 à 288 ; — 3 juin, p. 303 à 307 : « *Die Anwendung von Gelenken bei Brückenbauten* ». Communication faite au XIe Congrès du « Deutschen Beton Vereins » tenu à Berlin en 1908, par M. l'Ing. dipl. A. Köhler, Directeur technique de la maison Windschild et Langelott, de Cossebaude près Dresde.

8. — Au pont de la Schwimmschule, à Steyr (arc en béton armé de 42^m à 1/16, à 3 articulations) la culée tassa beaucoup au décintrement. — La voûte ne souffrit pas.

Kersten. *Brucken in Eisenbeton*. — II « *Bogenbrücken* », p. 143.

9. — MM. Dyckerhoff et Widmann ont construit, en 1902, pour l'Exposition de Dusseldorf, un pont en béton à 3 articulations roulantes en granit (Tableau synoptique, p. 266).

Bien que le sol de fondation fût peu résistant, le pont se comporta très bien pendant 6 ans.

Avant de le démolir, en octobre 1908, on l'essaya à outrance, en chargeant une 1/2 voûte.

Des fissures se produisirent sous les efforts de :

196^k à la compression dans la 1/2 voûte chargée; 30^k à la tension, dans la 1/2 voûte non chargée.

Les articulations de clef seules s'exfolièrent.

On dut faire sauter le pont.

Dr Ing. F. von Emperger. — Handbuch für Eisenbetonbau, 2e édition, vol. I, p. 214 à 230.

10. — Voir Tome III, Livre II, Titre III, chap. IV, § III, art. 4.

11. — M. Mesnager a articulé, en réduisant la section en 3 points, les voûtes en béton armé : 1° - du Canal Saint-Martin à Paris (Annales des Ponts et Chaussées, 1910, vol. IV, p. 176); 2° - d'Amélie-les-Bains (arche de 44^m à 1/6,66) (Génie Civil, 27 août 1910).

12 à 24. — Voir, pour ces ponts, les Tableaux synoptiques, Tome IV, pages 261, 264, 266, 269, 271.

Voici, par État, le nombre des voûtes allemandes ≥ 40m, articulées ou non :

Voûtes ≥ 40m :		articulées				inarticulées			
		Pont de *(On a souligné les ponts sous rails)*	Matériaux	Nombre d'ouvrages	Nombre de voûtes ≥ 40m	Pont de *(On a souligné les ponts sous rails)*	Matériaux	Nombre d'ouvrages	Nombre de voûtes ≥ 40m
Allemagne du Nord et de l'Est	Prusse rhénane					Mehring [25] Schweich Trittenheim Longuich	B	4	13
	Hesse	Gräveneck	B	1	1				
	Hanovre	Grasdorf	B	1	1				
	Saxe [26]	Gohren [27] Chemnitz	MOV B	2	2	Kleinwolmsdorf sur la Chemnitz [27] Plauen [27]	MEV MOV	3	3
	Silésie					Wengern [27] Ziegenhals Michelau Neuhammer Schwusen Kupferhammer Krappitz Gross-Kunzendorf	MOV	8	8
			Totaux	**4**	**4**		*Totaux*	**15**	**24**
Allemagne du Sud	Lorraine	Malling Moulins-lez-Metz	B Bandx MEV Corps : B	2	6				
	Grand Duché de Bade	Mannheim	Bandx : PT Corps : B	1	2	Weisenbach Gutach Schwändeholzdobel Langenbrand	B PT	4	4
	Wurtemberg	Hofen Marbach Baiersbronn Munderkingen Wallstrasse Hochberg Neckargartach	PT Bandx PT Corps MEV PT B	7	12	Teinach [28] Huzenbach	PT	2	2
	Hohenzollern	Inzigkofen Neckarhausen	B	2	2				
	Bavière	Ps de Munich [29] : Prince-Régent, Max-Joseph, Maximilien, Cornélius Reichenbach Wittelsbach Elise [29] Garching Kempten Illerbeuren	PT Bandeaux PT Corps B B	12	13				
			Totaux	**24**	**35**		*Totaux*	**6**	**6**

25. — Projet et Entreprise : MM. Liebold et Cie, d'Holzminden (Brunswick).
26. — C'est en Saxe que Köpcke a pour la 1re fois articulé des voûtes.
27. — Projet et Entreprise : MM. Liebold et Cie, de Langebrück (Saxe).
28. — C'est parce qu'on a observé des fissures au décintrement, qu'on a articulé, depuis, la plupart des grandes voûtes du Wurtemberg.
29. — Projet et Entreprise : MM. Sager et Woerner, de Munich.

§ 3. — *QUELLES VOÛTES CONVIENT-IL D'ARTICULER ?*

Art. 1. — Voûtes sur appui invariable.

A. - En maçonnerie appareillée : pas d'articulations. — Soit à construire une voûte sur un appui rigoureusement invariable, par exemple sur du rocher.

Dans la construction, on préviendra les fissures sur cintre en y ménageant des vides aux bonnes places ; les fissures au décintrement, en matant énergiquement les joints vides et en la laissant longtemps sur cintre.

On n'y a d'ailleurs rien à craindre plus tard des changements de température : on observera, au-dessus des reins, des fentes dans les tympans, le parapet, mais non dans la voûte.

B. - En béton : il est prudent d'articuler au moins les arcs très tendus. Mais, au lieu d'une voûte appareillée, supposons une voûte en béton.

Une voûte en maçonnerie est divisée par ses joints ; les efforts, par conséquent les raccourcissements ou allongements, leur sont à peu près normaux : s'il y a fissure, c'est suivant un joint.

Dans un monolithe en béton, les mouvements ne sont ni localisés ni régularisés par l'appareil. Il peut se produire des écrasements, des fissures irrégulières aux angles rentrants, aux changements de forme, — spécialement entre une culée massive et la naissance d'un arc très surbaissé.

On aura évité les fissures sur cintre en construisant par tranches. Mais on n'est pas garanti des fentes au décintrement, aux changements de température.

Sans doute, on a construit sans les articuler de grandes voûtes en béton ; toutefois elles sont récentes, et peu sont très surbaissées [30].

On en a articulé de très grandes [30], les unes peu surbaissées, — ce n'était guère

30. **VOÛTES EN BÉTON ⩾ 40m**

Date	Pont de :	*Pays*	Intrados Voie portée	Portée	Surbaissement
	1° INARTICULÉES				
1870-73	Pont-sur-Yonne	*France*	E aq	40m	1/5
1885	Weisenbach	*Allemagne*	Ā aq	40	1/8
1901-03	Big-Muddy	*Ets-Unis*	E Fr	42.67	1/4.67
1903-04	Mehring	*Allemagne*	Ā	46	1/7.45
1905-06	Schweich	*Allemagne*	Ā	46	1/7.45
1904-08	Connecticut Ave	*Ets-Unis*	C	45.72	1/2
1906	Guggersbach	*Suisse*	Â	50.20	1/6.11
1906-08	Walnut-Lane	*Ets-Unis*	ÂÂ rte	70.71	1/3.32
1907-08	Trittenheim	*Allemagne*	Ā	46	1/7.45
1908-09	Edmondson Ave	*Ets-Unis*	E	42.37	1/3.17
1908-10	Rocky River	*Ets-Unis*	ÂÂ	85.34	1/3.46
1909-11	Longuich	*Allemagne*	Ā	46 43	1/7.45 1/8.05
	2° ARTICULÉES				
1893	Munderkingen	*Allemagne*	Ā rte	59	1/10
1895	Inzigkofen	*Allemagne*	Ā rte	47.90	1/9.81
1895-96	Coulouvrenière	*Suisse*	Ā rte	40	1/7.41
	2° ARTICULÉES *(Suite)*				
1898-1900	Chemnitz	*Allemagne*	E Fr	43m10	»
1899-1900	Neckarhausen	*Allemagne*		59.40	1/11
1899-1900	Grasdorf	*Allemagne*	Ā rte	40	1/8.88
1899-1901	Malling	*Allemagne*	Ā rte	40	1/8.56
1901-03	Hochberg	*Allemagne*	Ā rte	40	1/7.41
1902-03	Reichenbach	*Allemagne*		44	1/10
1903-04	Illerbeuren	*Allemagne*	Ā Fr	59	1/5.82
1903-05	Neckargartach	*Allemagne*	Ā rte	40	1/9.14
1904-05	Wallstrasse	*Allemagne*	Ā rte	65.45	1/5.48
1904-05	Wittelsbach	*Allemagne*	Ā rte	44	1/10
1904-05	Moulins-l.-Metz	*Allemagne*	Ā rte	44 40	1/7.72 1/8.37
1905-08	Mannheim	*Allemagne*	Ā rte	59.50	1/10.56
1906	Kempten	*Allemagne*	Â Fr	64.50	1/2.34
1906-07	Elise	*Allemagne*	Ā rte	47.50	1/9.88
1907-08	Garching	*Allemagne*	E Fr	44.35	1/3.32
1911-12	Gräveneck	*Allemagne*	Â rte	48	1/6.24

nécessaire, — les autres très surbaissées : pour celles-ci, grandes ou petites, à peine de fissures graves, il le fallait.

Art. 2. — Voûtes sur appui qui peut céder : articuler au moins les très surbaissées. — La grande voûte peut être imposée par motif d'aspect, sur terrain un peu compressible [31, 32] : d'ailleurs, il y a quelquefois des surprises en fondation.

On peut être forcé d'appuyer contre une haute pile-culée, qui se courbera sous la poussée, les voûtes d'accès à une travée métallique [33], de jeter une voûte plate d'élégissement entre deux grandes voûtes, qui oscilleront sous les variations de température [34].

Dans tous les cas où les appuis de la voûte peuvent reculer, s'enfoncer inégalement, il convient vraiment d'articuler.

Une voûte articulée est souple, flexible : il n'est plus nécessaire de l'appareiller : le béton y suffit.

Art. 3. — Réserves sur la durée des articulations métalliques. Les premières grandes voûtes articulées (à partir de 1885) ne l'étaient qu'au poids mort : on condamnait les articulations avant l'ouverture à la circulation, ce qui préservait de la rouille les rotules en fonte, en acier.

C'est seulement de 1895 que datent les premières grandes voûtes articulées de façon permanente.

Il y a donc encore lieu de faire toutes réserves sur la durée et le fonctionnement de tout système d'articulation, — sur la conservation d'articulations métalliques qu'il est très difficile d'entretenir, impossible de remplacer.

31. — Ponts sur pilotis de Vizille, Tome I, p. 93 ; de Turin, Tome III, p. 199.

32. — Pont de Chester, Tome III, p. 29.

33. — Viaduc métallique de Kubel sur la Sitter. — Arches d'accès de 25^{m} butant contre une pile-culée de 87^{m} de hauteur. — On les a articulées (Tableau synoptique, Tome IV, p. 266).

34. — Au pont des Amidonniers, Tome I, p. 193, avant d'être chargées de la dalle en béton armé, les voûtes d'élégissement en ellipse de $11^{m}60$ et de $10^{m}10$ au 1/4 s'ouvraient :

	à la clef	aux retombées
en été........	à l'extrados	à l'intrados
en hiver	à l'intrados	à l'extrados

Elles s'étaient articulées elles-mêmes.

PONTS DÉCRITS DANS LE TOME IV

INDEX ALPHABÉTIQUE

TABLE DES MATIÈRES

DU TOME IV

2ME PARTIE. — VOÛTES ARTICULÉES

LIVRE I. · POURQUOI ET COMMENT ON A ARTICULÉ DES VOÛTES

TYPES D'ARTICULATIONS. — *PRINCIPES.* — *FORMULES.* — *EXPÉRIENCES*

HISTORIQUE. — CLASSEMENT DES VOÛTES ARTICULÉES

TITRE III. — COMMENT ON A ARTICULÉ LES VOÛTES : QUATRE TYPES D'ARTICULATIONS

CHAPITRE I. — ARTICULATIONS SUR PLOMB

TITRE III. — TYPES D'ARTICULATIONS *(Suite)*

CHAPITRE II. — ARTICULATIONS ROULANTES

CHAPITRE III. — ARTICULATIONS TOURNANTES

TITRE IV. — HISTORIQUE.

ARTICULER LES VOUTES EST UNE IDÉE FRANÇAISE

TITRE V. — CLASSEMENT DES VOÛTES ARTICULÉES

LIVRE II. - DESCRIPTION DES PONTS QUI ONT OU AVAIENT DES VOÛTES ARTICULÉES DE 40m ET PLUS DE PORTÉE. TABLEAUX SYNOPTIQUES. — MONOGRAPHIES.

1° — VOÛTES SEMI-ARTICULÉES

ARTICULATIONS SUR PLOMB

ARCS TRÈS SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\overline{A}^1$ r^{te} (≥ 40m)

VOÛTES SEMI-ARTICULÉES ARTICULATIONS SUR PLOMB

ARCS TRÈS SURBAISSÉS (Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE A¹ r^te (≥ 40m) (Suite)

ARTICULATIONS A GENOU

ARCS TRÈS SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE A¹ r^te (≥ 40m)

VOÛTES SEMI-ARTICULÉES ARTICULATIONS A GENOU

ARCS TRÈS SURBAISSÉS *(Suite)*

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\overline{A}^1$ Fr (⩾ 40m)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE $\overline{A}^n$ rte (⩾ 40m)

2° -- VOÛTES ARTICULÉES *(DE FAÇON PERMANENTE)*

ARTICULATIONS SUR PLOMB

ELLIPSES

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\underline{E}^n F^r$ ($\geqslant 40^m$)

ARTICULATIONS ROULANTES

ELLIPSES

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\underline{E}^n F^r$ ($\geqslant 40^m$)

VOÛTES ARTICULÉES ARTICULATIONS ROULANTES (*Suite*)

ARCS PEU SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE A¹ Fʳ ($\geqslant$ 40ᵐ)

ARCS TRÈS SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE A¹ Rᵗᵉ ($\geqslant$ 40ᵐ)

VOÛTES ARTICULÉES — ARTICULATIONS ROULANTES

ARCS TRÈS SURBAISSÉS *(Suite)*

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\overline{A}^1$ r^{te} ($\geqslant 40^m$) *(Suite)*

VOÛTES ARTICULÉES ARTICULATIONS ROULANTES

ARCS TRÈS SURBAISSÉS (*Suite*)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE A[1] Fr (⩾ 40m)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE A[n] rte (⩾ 40m)

VOÛTES ARTICULÉES — ARTICULATIONS ROULANTES

ARCS TRÈS SURBAISSÉS *(Suite)*

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE $\bar{A}^n$ 1re ($\geqslant$ 40^m) *(Suite)*

VOÛTES ARTICULÉES ARTICULATIONS ROULANTES

ARCS TRÈS SURBAISSÉS *(Suite)*

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE $\overset{\frown}{\mathbf{A}}{}^{n}$ r^te^ $(\geqslant 40^{m})$ *(Suite)*

Pages.

VOÛTES ARTICULÉES ARTICULATIONS ROULANTES *(Suite)*

ARCS ASSEZ SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\widehat{A}^1$ r^te^ (> 40^m^)

ARTICULATIONS TOURNANTES

ARCS TRÈS SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\overline{A}^1$ r^te^ (> 40^m^)

VOÛTES ARTICULÉES ARTICULATIONS TOURNANTES

ARCS TRÈS SURBAISSÉS (*Suite*)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE A¹ rte (⩾ 40m) (*Suite*)

VOUTE ARTICULÉE DE 40m EN BÉTON PEU ARMÉ

QU'ON AURAIT, A TORT, CHERCHÉE AU LIVRE II

LIVRE III. - CE QUE L'EXPÉRIENCE ENSEIGNE DE SPÉCIAL AUX VOÛTES ARTICULÉES

TITRE I - DISPOSITIONS - DIMENSIONS. AVANTAGES - INCONVÉNIENTS DE CHAQUE TYPE D'ARTICULATION

CHAPITRE I. – ARTICULATIONS SUR PLOMB

CHAPITRE II. — ARTICULATIONS ROULANTES

CHAPITRE III. — ARTICULATIONS TOURNANTES

Balanciers tournant autour d'un tourillon

CHAPITRE IV. — ARTICULATIONS A GENOU

Employées seulement comme articulations provisoires, puis condamnées.

Rotules d'acier prises dans des caissons en tôle.

CHAPITRE V. — DISPOSITIONS DES ARTICULATIONS DANS LES PONTS BIAIS 272

TITRE II. — QUELQUES DIMENSIONS ET DISPOSITIONS SPÉCIALES AUX VOÛTES ARTICULÉES

TITRE III. — QUELQUES ÉLÉMENTS DE COMPARAISON ENTRE LES VOÛTES INARTICULÉES ET ARTICULÉES

TITRE IV. — QUELLES VOÛTES FAUT-IL ARTICULER ?

ERRATA

DU TOME IV

Page 143, Monographie $\underset{\leftrightarrow}{\overline{\mathbf{A}}}^{1}$ r^{te} $(\geqslant 40^{m})^{3}$, — Titre, — 1re ligne :

au lieu de : *BAVIÈRE*, lire *WURTEMBERG*.

Voir aussi l'**Errata général,** à la fin du Tome V.

94-B16743



GETTY CENTER LIBRARY



3 3125 00722 4344